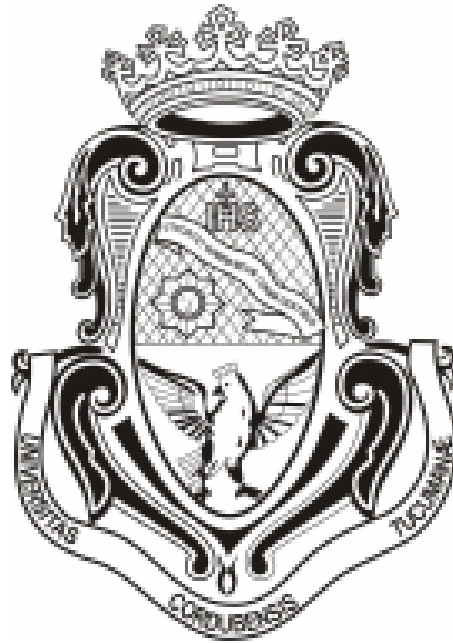


UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES.-



ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA (I.M.E – I.M. – T.M.).-

CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL COMPUESTO PET-VIDRIO.-

Autor: SANTAMARINA RODRIGO EMANUEL.-

Carrera: INGENIERÍA MECÁNICA.-

Director de Tesis: Ing. ELASKAR OMAR.-

Córdoba Capital, Argentina, 2015



PRÓLOGO.-

El presente trabajo de investigación, que tiene el carácter de Proyecto Integrador para finalizar los estudios de grado en esta casa de estudios, fue realizado por un estudiante de Ingeniería Mecánica. Tiene por finalidad iniciar las investigaciones relacionadas con la utilización de PET y VIDRIO provenientes de envases desechados, para realizar un material compuesto de matriz polimérica (PET) y como carga el VIDRIO, con la principal motivación de promover el reciclado y utilizarlo en una causa en beneficio de la población como es la construcción de viviendas ya que dicho material se pensó como sustituto de los tradicionales materiales de construcción. Hasta el día de hoy, no se encuentran antecedentes de trabajos relacionados con la reutilización de PET y VIDRIO en esta casa de estudios.

Este trabajo proveerá información de base sobre las propiedades de un nuevo material, lo cual abre la puerta para continuar las investigaciones buscando mejoras en propiedades mecánicas y aplicaciones en otros campos, entre otras. La dirección de este trabajo estará bajo el cargo del Ingeniero Omar Elaskar, y se desarrollara en el Laboratorio del Departamento de Materiales de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

Este trabajo puede dividirse en tres secciones principales:

Primera sección: una introducción al tema de estudio, donde se expone la problemática, y los fundamentos por los cuales se decidió realizar este trabajo. En esta sección también indicaremos los objetivos del trabajo.

Segunda sección: un marco teórico donde se pondrá en evidencia algunos antecedentes de materiales similares, se hablara de la arcilla y la problemática que trae la producción de ladrillos, así como los residuos sólidos urbanos en la Argentina, también se expondrán las características del PET y VIDRIO como materiales, y por ultimo un breve paso por el mundo de los materiales compuestos.

Tercera sección: denominada trabajo ingenieril, se estudiara la forma más conveniente para utilizar estos residuos como parte de un nuevo material bajo hipótesis, abalada por la investigación experimental y la información obtenida por este medio. Se obtendrán los resultados de la caracterización del nuevo material, y finalmente, realizaremos las conclusiones respectivas de acuerdo a las propiedades obtenidas.

ÍNDICE.-

Prólogo.....	II
Índice de figuras.....	IX
Índice de tablas.....	XI
Índice de gráficos.....	XII
Dedicatorias y agradecimientos.....	XIII
Resumen general del Proyecto Integrador.....	XIV
Introducción.....	1
Objetivos.....	3
Alcance.....	3
Planteamiento del problema.....	4
MARCO TEÓRICO	
1.- ANTECEDENTES.....	5
1.1.- Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE)....	5
1.1.1.- Descripción y Origen.....	5
1.1.2.- Producción de los elementos constructivos.....	5
1.1.3.- Propiedades técnicas de los elementos constructivos.....	6
1.2.- Caracterización de materiales compuestos a base de PET reciclado reforzado con 5 y 40% en peso de partículas de ZINC.....	7
1.2.1.- Introducción.....	7
1.2.2.- Metodología.....	9
1.2.2.1.- Descripción del método.....	9
1.2.2.2.- Preparación de los materiales.....	9



1.2.2.3.-Fabricación de las probetas.....	9
1.2.2.4.- Técnicas de caracterización.....	10
1.2.3.- Resultados y discusiones.....	11
1.2.3.1.- Medición de la densidad aparente.....	11
1.2.3.2.- Porcentaje de absorción de agua.....	11
1.2.3.3.- Medición de la dureza shore D.....	12
1.2.3.4.-Ensayo de compresión.....	13
1.2.3.5.- Ensayo de flexión.....	14
1.2.4.- Conclusiones.....	15
1.3.- Breve introducción a la arquitectura reciclable.....	15
2.- ARCILLA COMO MATERIAL.....	17
2.1.- Propiedades Físicas de las arcillas.....	17
2.2.- Propiedades químicas de las arcillas.....	17
2.3.- Acción del calor sobre las arcillas.....	18
2.4.- Coloración.....	18
2.5.- El ladrillo tradicional.....	18
3.- PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DE LAS LADRILLERAS.....	20
3.1.- Fabricación artesanal.....	20
3.2.- Contaminación ambiental.....	21
3.2.1.- Contaminación del aire.....	21
3.2.2.- Contaminación del agua.....	22
3.2.3.- Contaminación del suelo.....	22
3.2.4.- Contaminación atmosférica.....	22



3.3.- Tipos de contaminantes originados por ladrillera artesanal.....	23
4.- RESIDUOS SÓLIDOS EN LA ARGENTINA.....	24
4.1.- Demografía.....	25
4.2.- Composición física.....	26
4.3.- Tratamiento: compostaje y reciclado.....	27
4.4.- Elementos reciclables y aplicables al campo de la construcción.....	28
4.4.1.- Papel y cartón.....	28
4.4.2.- Vidrio.....	28
4.4.3.- Hierro, acero y aluminio.....	29
4.4.4.- Maderas y otros.....	29
4.4.5.- Plástico.....	30
5.- PLÁSTICO COMO MATERIAL.....	32
5.1.- Historia.....	32
5.2.- Evolución.....	33
5.3.- Características Generales de los Plásticos.....	34
5.3.1.- Polímeros.....	34
5.3.2.- Técnicas de Moldeo de los Plásticos.....	35
5.3.3.- Colada.....	36
5.3.4.- Espumado.....	36
5.3.5.- Calandrado.....	36
5.4.- El PET como material.....	36
5.4.1.- Propiedades como producto.....	38
5.4.2.- Otras propiedades.....	38



5.4.3.- Características del PET.....	38
5.4.4.- Resistencia química del PET.....	39
6.- VIDRIO COMO MATERIAL.....	40
6.1.- Composición del vidrio.....	40
6.2.- Características mecánicas.....	41
6.3.- Características térmicas.....	43
6.4.- Características químicas.....	44
7.- MATERIALES COMPUESTOS.....	45
7.1.- Clasificación de los materiales compuestos.....	46
7.1.1.- Clasificación según la forma de los constituyentes.....	46
7.1.2.- Clasificación según la naturaleza de los constituyentes.....	46
7.1.3.- Clasificación según el tamaño de la fase dispersa.....	47
7.2.- Materiales compuestos de matriz orgánica: Constituyentes.....	48
7.2.1.- Matrices. Generalidades.....	48
7.2.2.- Matrices termoestables.....	49
7.2.3.- Matrices termoplásticas.....	52
<i>DESARROLLO TRABAJO INGENIERIL</i>	
8.- INTRODUCCIÓN.....	54
8.1.- Hipótesis.....	54
8.2.- Metodología.....	55
8.2.1.- Selección de los materiales.....	55
8.2.1.1.- Selección de los parámetros.....	55
8.2.2.- Proceso de fabricación.....	56



8.2.2.1.- Preparación de los materiales.....	57
8.2.2.2.-Fabricación de moldes.....	58
8.2.2.3.-Fabricación de las probetas.....	60
8.2.2.3.1- Probetas realizadas.....	62
8.2.2.3.2.- Observaciones sobre las probetas fabricadas.....	64
8.3.- Caracterización.....	64
8.3.1.- Ensayos y normas.....	65
8.3.1.0.- Caracterización microestructural.....	65
8.3.1.1.- Caracterización física.....	66
8.3.1.1.1.- Densidad aparente.....	66
8.3.1.1.2.- Absorción de agua.....	68
8.3.1.1.3.- Conductividad térmica.....	69
8.3.1.2.- Caracterización mecánica.....	72
8.3.2.2.1.- Resistencia a la compresión.....	71
8.3.2.2.2.- Resistencia al impacto.....	76
9.- RESULTADOS.....	79
9.1.- Caracterización microestructural.....	79
9.2.- Caracterización física.....	80
9.2.1.- Densidad aparente.....	80
9.2.2.- Absorción de agua.....	81
9.2.3.- Conductividad térmica.....	81
9.3.- Caracterización mecánica.....	81
9.3.1.- Resistencia a la compresión.....	81



9.3.2.- Resistencia al impacto.....	83
10.- CONCLUSIONES.....	84
11.- LÍNEA DE INVESTIGACION PROPUESTA.....	87
12.- BIBLIOGRAFIA.....	88
13.- ANEXOS.....	89

ANEXO A: ASTM D 256-04, “Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics”.

ANEXO B: ASTM D 578-98, “Standard Test Method for Water Absorption of Plastics”.

ANEXO C: ASTM D 695-02a, “Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics”.

ANEXO D: ISO 604:2002, “PLÁSTICOS - MÉTODOS DE PRUEBA / Parte 5: PROPIEDADES MECÁNICAS / Sección 8: Determinación de las propiedades de compresión.”

**ÍNDICE DE FIGURAS.-**

Figura 1.- Densidad aparente.	11
Figura 2.- Absorción de agua.	12
Figura 3.- Dureza.	12
Figura 4.- Resistencia a la compresión.	13
Figura 5.- Resistencia a la flexión.	14
Figura 6.- Composición de los residuos sólidos en la Argentina.-	26
Figura 7.- Identificación de los diferentes plásticos.	31
Figura 8.- Reciclaje del PET.	31
Figura 9.- Esquema material compuesto.	45
Figura 10.- Propiedades mecánicas de la matriz, el refuerzo y el material compuesto.	45
Figura 11.- Tipos de disposición de fibras.	46
Figura 12.- Tipos de materiales compuestos estructurales.	46
Figura 13.- Clasificación por tamaño de la fase dispersa.	48
Figura 14.- Adhesión mecánica de interfase.	57
Figura 15.- Polvo de PET.	57
Figura 16.- Polvo de VIDRIO.	57
Figura 17.a.- Polvo de PET aumentada x20.	58
Figura 17.b.- Polvo de VIDRIO aumentado x20.	58
Figura 18.- Molde de acero para probetas cilíndricas.	59
Figura 19.- Molde para probetas cuadradas.	60
Figura 20.- Balanza utilizada.	60
Figura 21.- Horno eléctrico tipo Mufla utilizado.	61
Figura 22.- Prensa hidráulica uniaxial utilizada.	61
Figura 23.- Probeta cilíndrica.	63
Figura 24.- Probeta cuadrada.	63
Figura 25.- Microscopio óptico utilizado.	65
Figura 26.- Muestra de PET aumentada x40.	65
Fig. 27.- Muestra de PET con VIDRIO N°1 aumentada x40.	66
Fig. 28.- Muestra de PET con VIDRIO N°2 aumentada x40.	66
Figura 29.- Ensayo de absorción de agua.	69
Fig. 30.- Esquema representativo del flujo de calor a través de una superficie, y la ley de Fourier.	70
Figura 31.- Dispositivo utilizado para el ensayo de conductividad térmica.	71
Figura 32.- Probeta cilíndrica relación 2:1.	72
Figura 33.- Probeta cilíndrica relación 1:1.	72



Figura 34.- Máquina de utilizada para el ensayo de compresión.	73
Figura 35.- Probeta a ensayar bajo compresión.....	73
Figura 36.- Probetas utilizadas en el ensayo de impacto.	76
Figura 37.- Dispositivo utilizado para el ensayo de impacto.....	77
Figura 38.- Fijación de la probeta de impacto.....	77
Figura 39.- Muestra de PET aumentada x40.	79
Figura 40.- Muestra de PET con VIDRIO aumentada x40. Las cavidades se encuentran encerradas...	79
Figura 41.- Probetas de PET con falla frágil.....	81
Figura 42.- Probetas de PET. La de la izquierda descascaró, las otras presentan bóvedas de aire.	82
Figura 43.- Probetas de PET con VIDRIO. Falla tipo barril, por planos.	82
Figura 44.- Probeta de PET con VIDRIO. Pone en evidencia la falla por planos.	82
Figura 45.- Probeta de PET con VIDRIO. Uno de los planos separados de la fisura ocasionada en el ensayo.	82
Figura 46.- Probeta de PET con VIDRIO.....	82
Figura 47.- Probeta de hormigón.	82
Figura 48.- Probetas de PET ensayadas.....	83
Figura 49.- Probetas de PET con VIDRIO ensayadas.....	83

**ÍNDICE DE TABLAS.-**

Tabla 1.- Densidad poblacional en la Argentina.....	25
Tabla 2.- Datos de las probetas cilíndricas de PET realizadas.	62
Tabla 3.- Datos de las probetas cilíndricas de PET con VIDRIO realizadas	63
Tabla 4.- Datos de densidad de las probetas de PET con VIDRIO.	67
Tabla 5.- Datos de densidad de las probetas de PET.....	67
Tabla 6.- Parámetros ambientales durante el ensayo.	69
Tabla 7.- Datos de absorción de agua para las probetas de PET.....	69
Tabla 8.- Datos de absorción de agua para probetas de PET con VIDRIO.....	69
Tabla 9.- Datos obtenidos para la probeta de PET para el ensayo de conductividad térmica.....	71
Tabla 10.- Datos obtenidos para la probeta de PET con VIDRIO para el ensayo de conductividad térmica.	71
Tabla 11.- Datos obtenidos para las probetas cilíndricas de PET para el ensayo de compresión.	74
Tabla 12.- Datos obtenidos para las probetas cilíndricas de PET con VIDRIO para el ensayo de compresión.....	74
Tabla 13.- Probetas de PET para el ensayo de impacto.	78
Tabla 14.- Resultados del ensayo de impacto para probetas de PET.....	78
Tabla 15.- Probetas de PET con VIDRIO para el ensayo de impacto.	78
Tabla 16.- Resultados del ensayo de impacto para probetas de PET con VIDRIO.	78
Tabla 17.- Densidades obtenidas.	80
Tabla 18.- Porcentaje de agua absorbida obtenida.	80
Tabla 19.- Datos y resultado obtenidos para la conductividad térmica.	81
Tabla 20.- Resultados del ensayo de compresión.	81
Tabla 21.- Resistencia al impacto obtenida.....	83



ÍNDICE DE GRÁFICOS.-

Gráfico 1.- Valores de carga obtenidos en las diferentes probetas de PET.	74
Gráfico 2.- Valores de carga obtenidos en las diferentes probetas de PET.	75
Gráfico 3.- Comparación de densidades.	80
Gráfico 4.- Comparación de densidades con materiales tradicionales de la construcción.....	84
Gráfico 5.- Comparación de absorción de agua con materiales tradicionales de la construcción.	85
Gráfico 6.- Comparación de conductividad térmica con materiales tradicionales de la construcción..	85
Gráfico 7.- Comparación de resistencia a la compresión con materiales tradicionales de la construcción.	85



DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS.-

Con este proyecto se cierra una etapa de la vida, tal vez la más formadora, la de mayor aprendizaje y crecimiento como persona, la etapa de ser universitario. El esfuerzo y sacrificio que demandó fue importante, pero las satisfacciones y alegrías que se lograron a través del desenlace de este ciclo no tienen comparación alguna; uno se llena de valores y principios fundamentales para encarar lo que nos queda por vivir. Se cierra una etapa, pero se abre una nueva como futuro profesional, llena de nuevos desafíos y cosas por aprender.

En primer lugar quiero agradecer a mis padres, Raúl y Ángela, ya que su apoyo incondicional y confianza ciega en mí fueron mi principal motivación, más allá de los recursos y medios brindados para llevar a cabo los estudios. A mi hermana mayor, Paula, compañera de vida, consejera, madre sustituta. A mis amigos, hermanos del alma que desde lejos me apoyaron y dieron fuerzas para terminar y triunfar. Y como no agradecer de todo corazón a mis hermanos queridos del alma que me dio esta etapa, donde formamos un vínculo más que especial y para toda la vida. También quiero agradecer al resto de mi familia, mi hermana Fernanda y mi sobrino Marquitos, abuelas y tías.

Este trabajo fue posible gracias al asesoramiento y constante apoyo de los Miembros del departamento de Materiales y Tecnología, y en especial de mi Director el Ingeniero Omar Elaskar, a quien estoy agradecido por su constante apoyo.

También quiero agradecer de forma especial por su ayuda brindada a las siguientes personas:

Al Ingeniero Alfredo Andrés Corominas, quien me brindó su apoyo incondicional y sabios consejos de un experimentado de la vida, más allá de su buen humor y predisposición.

Al Ingeniero Luciano Salvador Grinschpun del Laboratorio del Departamento de Materiales y Tecnología de nuestra casa de estudios, por sus consejos, ayuda y permanente colaboración para llevar a cabo gran parte de este trabajo.

A José Bustamante, del Laboratorio del Departamento de Aeronáutica por su predisposición y colaboración constante con el desarrollo del trabajo.

Finalmente quiero agradecer a la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, por haberme formado como una mejor persona con ética y moral, y las experiencias que me ha brindado en el transcurso de esta carrera y a la que siempre me sentiré orgulloso de pertenecer.



RESUMEN GENERAL DEL PROYECTO INTEGRADOR.-

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL COMPUESTO PET-VIDRIO.

AUTOR: Santamarina, Rodrigo Emanuel.

FACULTAD: Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

DIRECTOR: Ingeniero Elaskar, Omar.

RESUMEN:

En este estudio se analiza el comportamiento físico y mecánico que presenta un nuevo **material compuesto** formado por una matriz polimérica de PET reciclado y reforzado con partículas de VIDRIO también reciclado, ambos a partir de envases. Para este análisis se obtiene polvo en una sola composición de 40% en peso de partículas de VIDRIO, con el fin de fabricar por una tecnología “símil” a la de polvos las muestras necesarias para determinar el comportamiento físico y mecánico de este material mediante ensayos. En ésta caracterización se utilizan probetas procesadas a una temperatura constante de 250 °C, aplicada por el tiempo mínimo para la total fusión del material, luego fueron comprimidas calientes a 16 [kg/cm²] y enfriadas a temperatura ambiente.

Primero se realizó un análisis comparativo con respecto al PET de las propiedades físicas y mecánicas. Los resultados obtenidos muestran que el nuevo material presenta mayor densidad, tenacidad y conductividad térmica; igual absorción de agua, y una resistencia a la compresión levemente menor. Luego se hizo una comparación con los materiales tradicionales de construcción, la cual deriva que el nuevo material es apto para ser un excelente sustituto en el ámbito de la construcción, presentando como ventajas la casi nula absorción de agua, la baja conductividad térmica y la alta resistencia a la compresión.

INTRODUCCIÓN.-

El **deterioro ambiental** que viene agravándose en las últimas décadas en todo el mundo afecta fundamentalmente a la naturaleza a través de elevados niveles de explotación de los recursos naturales (incluyendo el suelo fértil), contaminación de la atmósfera, agotamiento y contaminación de los recursos hídricos, ocasionados por la acción del hombre.

Particularmente, el **sector de la construcción** es responsable de grandes aportaciones económicas y sociales a través de la producción de bienes y servicios. Históricamente, este sector ha requerido de grandes cantidades de materias primas y energía, lo que consecuentemente provoca grandes cantidades de emisiones gaseosas, líquidas y sólidas, contaminantes del medio ambiente.

El proceso de extracción y explotación de **arcillas** para ladrillos convencionales provoca considerables impactos ambientales, con los consiguientes cambios en el medio natural, cuyas consecuencias se manifiestan con la **contaminación atmosférica** (la extracción de arena y grava de las canteras son las que más contribuyen en el aporte de partículas en suspensión, además del quemado de combustibles), **contaminación de aguas** (fuentes de abastecimiento de agua para las ladrilleras, son almacenadas en precarias piscinas quedan estancadas originando la formación de focos de infección), **contaminación del suelo** (residuos son desechados directamente sobre el suelo, produciendo infiltración en este), **erosión** (extracción de arena y grava de las canteras), **desequilibrio ecológico** (desforestación provocada para la obtención de leña para alimentar los hornos, daña la flora y la fauna autóctona) y otros. Además, generalmente las áreas donde se encuentran las ladrilleras carecen de servicios básicos, haciendo que las **condiciones de trabajo sean poco salubre**.

A lo largo del tiempo, los diferentes sistemas constructivos no han logrado reemplazar la utilización del **ladrillo** en la construcción, sobre todo en Latinoamérica. Esto se debe a dos causas fundamentales: una **económica**, ligada a los costos del mismo, y otra **cultural**, vinculada a la identificación histórica de este material con un cierto estatus. Su fabricación no demanda una tecnología sofisticada ni tampoco mano de obra calificada. Estas condiciones se mantienen en la actualidad debido a que no se están internalizando los costos ambientales de las externalidades producidas por la actividad a nivel de impacto ambiental.

Augenbroe (1998), por ejemplo, sugiere que el sector de la construcción comience a modificar su forma de trabajo, con un nuevo paradigma hacia una **construcción sustentable**: contemplando la satisfacción del usuario, el menor consumo de materia y energía, y el menor impacto medioambiental.

Algunos criterios para acceder a una selección del material de construcción sustentable ambiental correcto, se resumen a continuación:

- Ahorro energético.
- Valorización de residuos.
- Tecnología limpia.
- Durabilidad.

Por último, la **economía del material** brinda una alternativa al déficit habitacional, sobre todo en los países de Latinoamérica, donde alrededor de 135 millones de personas no cuentan con una vivienda digna, y por otro lado, plantea un acercamiento a una construcción más sustentable.

El tratamiento de **residuos sólidos**, no biodegradables (plásticos y vidrio), se ha convertido en una preocupación de orden mundial, dado a la gran acumulación de estos residuos que afecta gravemente el medio ambiente. La solución propuesta es realizar el **nuevo material** a partir del reciclaje, reutilización o recuperación de los materiales.

Siguiendo los criterios de selección de materiales medioambientalmente correctos planteados, se llegó a la determinación de realizar un material compuesto integrado por **materiales reciclados**: **Tereflato de Polietileno** (más conocido como PET) hace de matriz, y **VIDRIO** en forma de partículas es la carga.

El porqué de utilizar materiales **plásticos y vidrios**, en oposición a la idea de considerarlos como contaminantes por no ser biodegradables, pueden constituirse como una viable posibilidad no sólo para alcanzar un **equilibrio** entre las **necesidades de vivienda** y la **protección del medio ambiente** natural, sino además para minimizar el impacto económico dadas su versatilidad y funcionalidad al presentar propiedades como: durabilidad y resistencia a la corrosión, efectividad como aislante térmico y acústico, bajo costo frente a otros materiales constructivos, sencilla manipulación, y una gran vida útil por ser altamente reutilizables y reciclables.

Corresponde a este trabajo experimental, la tarea de elaborar, ensayar y caracterizar una mezcla de Tereflato de Polietileno (**PET**)-**VIDRIO**. Para determinar las propiedades mecánicas y de durabilidad, se elaboraran una serie de probetas que tengan las características ideales para los respectivos ensayos bajo normas, en el caso que sea posible.

OBJETIVOS.-

OBJETIVO PRINCIPAL:

Realizar la caracterización de un **material compuesto** realizado con materia prima reciclada, con el fin de reemplazar la tradicional arcilla para ladrillos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Determinar el **proceso de fabricación** más óptimo;
- Identificar y definir las **características físico-mecánicas** del material compuesto a ensayar;
- Establecer la importancia de la **reutilización del plástico y el vidrio** para contribuir a la reducción de las cargas sobre el medio ambiente.

ALCANCE.-

En este trabajo se pretende determinar las características, propiedades físicas/mecánicas de un nuevo material compuesto, con el fin de saber si es apto para su utilización en la construcción.



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.-

El crecimiento de la **población** no solo conlleva a la construcción de nuevas **viviendas**, sino también a un aumento de la **basura**. Por tales motivos, surgió la necesidad de buscar un **nuevo material** compuesto a base de materiales reciclados (PET y VIDRIO) que **sustituya** a la actual y tradicional **arcilla**, y que sea competencia del hormigón, involucrando la “construcción sustentable”.

En estos tiempos donde la concientización de la **sociedad** sobre cuidar nuestro Medio Ambiente ha crecido considerablemente, con este proyecto no solo se trata de **reciclar, reutilizar** basura, se busca obtener un material con una **energía más limpia** y que prácticamente no utilice **agua**, uno de los recursos básicos que cada vez se aprecia y protege más, para su obtención ni para la construcción de viviendas como es el caso del hormigón.

MARCO TEÓRICO.-

1.- ANTECEDENTES.-

Si bien no se ha encontrado antecedentes específicos de un material compuesto de PET y VIDRIO, se van a citar antecedentes relacionados con la reutilización del PET con propósitos similares al planteo propuesto, y que sirvan como base de partida.

Sobre materiales compuestos y en relación con la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, se menciona un trabajo realizado: “PUESTA EN VALOR DE RESIDUO DE CAUCHO PROVENIENTE DEL RECICLADO Y LA REUTILIZACION DE NEUMATICOS” de FRANCO DANIEL SILVA (2014). El cual trata del comportamiento de un material realizado con resina poliéster con carga de caucho.

1.1.- Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE).-

Nuevos materiales para mampuestos con plásticos reciclados.

1.1.1.- Descripción y Origen.-

La utilización de **plásticos reciclados** para la elaboración de elementos constructivos nació de una inquietud ecológica del equipo de investigación, que reconoce la importancia del reciclado para reducir la cantidad de residuos que se entierran sin utilidad alguna, o que se acumulan y queman en basurales a cielo abierto produciendo contaminación.

Los plásticos que se utilizan son: **PET** (polietileno-tereftalato), procedente de envases descartables de bebidas; y plásticos varios: PE (polietileno), BOPP (polipropileno biorientado) y PVC (policloruro de vinilo), procedentes de embalajes de alimentos reciclados; los cuales tienen partículas de aluminio y tintas aplicadas.

1.1.2.- Producción de los elementos constructivos.-

El primer paso en esta tecnología es el **triturado** de los residuos plásticos. El triturado se realiza en dos etapas, quedando finalmente el material con un tamaño de partículas similar al de la arena gruesa. No es necesario retirar las etiquetas ni las tapas de los envases; ni tampoco lavar los envases.

Las partículas plásticas se mezclan con **cemento** Portland en una hormigonera, luego se agrega agua con aditivos químicos incorporados. Cuando esta mezcla adquiere consistencia uniforme, se la vierte en una máquina de moldear ladrillos o bloques. Se realiza la compresión de la mezcla y la postura de los mampuestos utilizando una máquina rodante.

Se dejan en **reposo** los mampuestos durante un día y pasan a la etapa de curado con agua, en donde permanecen 7 días. Después de este tiempo, se los retira y se los almacena en pilas a cubierto hasta cumplir los 28 días desde su elaboración. Luego son llevados a obra para su uso en mamposterías de elevación.

Los **ladrillos** también pueden usarse para fabricar placas de ladrillos, con un procedimiento similar al de la placa Beno desarrollada en el CEVE por los Arquitectos Berretta y Novo (Patente 226794). En esta página web se detalla el procedimiento de fabricación (ver “Sistema constructivo Beno”).

1.1.3.- Propiedades técnicas de los elementos constructivos.-

Las propiedades fueron establecidas en Laboratorios de la Universidad Nacional de Córdoba y del INTI de Capital Federal.

- **Peso:** Es menor al de otros componentes constructivos tradicionales que se usan para la misma función, lo cual permite abaratar en traslados y en cimientos. Ej. El peso por unidad del ladrillo con PET y cemento es de 1,44 kg, mientras que el del ladrillo común es de 2,50 kg.
- **Conductividad térmica:** Proveen una excelente aislación térmica, superior a la de otros componentes constructivos tradicionales. Se pueden utilizar en cerramientos con un espesor menor, obteniendo el mismo confort térmico. Esto permite abaratar costos. Ej. El coeficiente de conductividad térmica del ladrillo con PET y cemento es de 0,15 W/mk, mientras que el del ladrillo común es de 0,75 W/mk.
- **Resistencia mecánica:** Es en general menor que la de otros componentes constructivos tradicionales. Es suficiente para que puedan ser utilizados en cerramientos no portantes de viviendas con estructura independiente. Ej. La resistencia característica a la compresión del ladrillo con PET y cemento es de 2 Mpa, mientras que la del ladrillo común es de 4 Mpa.
- **Absorción de agua:** Es similar a la de otros cerramientos tradicionales. Ej. absorción de agua del ladrillo con PET y cemento en masa es de 19,1 %, y en volumen 214 kg/m³.
- **Comportamiento a la intemperie:** Son resistentes a la acción de los rayos ultravioleta y ciclos alternados de humedad, según ensayo de envejecimiento acelerado utilizando el método del Q.U.V Panel.
- **Aptitud para el clavado y aserrado:** Son fáciles de clavar y aserrar, por lo que tienen aptitud para constituir sistemas constructivos no modulares.

- **Adherencia de revoques:** Poseen buena aptitud para recibir revoques con morteros convencionales, por su gran rugosidad superficial. Ej. La tensión de adherencia del ladrillo con PET y cemento es de 0,25 MPa.
- **Resistencia al fuego:** El ladrillo con PET y cemento tiene buena resistencia al fuego, según se comprobó en Ensayo de Propagación de Llama, del cual surge su clasificación como “Clase RE 2: Material combustible de muy baja propagación de llama”.
- **Permeabilidad al vapor de agua:** El ladrillo con PET y cemento tiene una permeabilidad al vapor de agua de 0,0176, similar a la del hormigón con agregado pétreo (0,028 g/mhkPa).
- **Resistencia acústica:** Es de 41 db, en el caso de un muro de 0,15 m. de espesor de ladrillos con PET y cemento revocado de ambos lados, similar a la de un muro de ladrillos cerámicos huecos del mismo espesor (42 db).

1.2.- Caracterización de materiales compuestos a base de PET reciclado reforzado con 5 y 40% en peso de partículas de ZINC.-

En este estudio se analiza el comportamiento físico y mecánico que presenta un nuevo **material compuesto** formado por una matriz polimérica de **PET** reciclado y reforzado con partículas de **Zinc**. Para este análisis se obtiene polvo en dos distintas **composiciones** de 5 y 40% en peso de partículas metálicas, con el fin de fabricar por tecnología de polvos las muestras necesarias para obtener los resultados que permitan determinar el comportamiento físico y mecánico de estos materiales. En ésta caracterización se ocupan probetas procesadas a una **temperatura** constante de 256 °C, aplicada isotérmicamente por 10, 15 y 20 minutos. Se realiza un **análisis** comparativo por microscopía óptica y estereoscópica. Los resultados obtenidos muestran que el material que presenta el mejor comportamiento mecánico y microestructural, es el que fue procesado isotérmicamente por 15 minutos y que presenta el mayor contenido de partículas de zinc.

1.2.1.- Introducción.-

Los polímeros forman una gran rama de los materiales que incluye a los termoplásticos, familia a la que pertenece el tereftalato de polietileno (**PET**), con el que se fabrican botellas que según la Confederación de Cámaras Industriales (CONCAMIN, 2008), suman anualmente nueve mil millones en México, de las cuales, según estudio de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM-2007), tan solo se recupera el 38.7%. De tal forma que se puede coadyuvar en la eliminación de un material que actualmente puede representar un problema ambiental, transformándolo en un bien de consumo. Considerando que los materiales termoplásticos empleados como **matriz**, permiten ser reforzados en

diferentes proporciones y combinaciones de elementos tanto cerámicos como metálicos e incluso poliméricos. Así estos **refuerzos** ayudan a reducir costos y modificar propiedades específicas con la intención de obtener una gama de materiales para usos particulares.

De acuerdo con Wang et al. (2009), Navia et al. (2007) y Machovic et al. (2008), con ciertas combinaciones de polímeros y refuerzos se pueden fabricar **materiales** antibacteriales, cerámicos porosos y cemento reforzado respectivamente. Así como estructuras de lápices, paneles para la industria automotriz, contenedores opacos, materiales de construcción, carpetas para pavimento y losetas de baja porosidad, acorde a los trabajos de investigación y patentes de Cook y Leidner (2003), Lustiger y Vallentage (2006), Zhenguo y Xiaoyan (2008), Rebeiz y Fowler (1994), Daisuke et al. (2005) y Arias et al. (2004). Cabe mencionar que entre los refuerzos para materiales de matriz polimérica más empleados está la fibra de vidrio ocupada por Rezaeian et al. (2009), sin embargo, también se ha usado: aserrín por Ahmad et al. (2008), microfibrillas de poliestireno por Saikrasun et al. (2009), hidroxiapatita por Zhang (2008), polietileno o fibras de poliéster por González et al. (2004), arcilla volcánica por Sánchez y Manero (2006), fibras de basalto y polvo de talco por Kra et al. (2008) nanotubos de carbono por Shiuan-Hua et al. (2007), entre otros.

Considerando los múltiples **usos** que se le puede dar al PET, se han desarrollado metodologías de procesamiento para conformar materiales compuestos a base de una matriz polimérica reforzada, obtenidos principalmente por procesos que combinan el **moldeo** por inyección termoplástica y la metalurgia convencional de **polvos**. Aunque no se encontró evidencia del uso de una técnica de polvos, (que incluya el mezclado de los componentes en polvo por molido mecánico, para ser conformados por prensado y pasar a un proceso final de sinterización isotérmica), aplicada a materiales compuestos, como la que se emplea en este estudio.

De tal forma que las **características** del PET mencionadas por Kalpakjian y Schmid (2008), Rezaeian (2009) y el Departamento de Química Orgánica (DQO-UV, 2011), relacionadas a su ligereza, resistencia, buen acabado superficial, bajo costo comparativo, alta relación resistencia peso particularmente cuando son reforzados, su facilidad de reciclamiento por métodos mecánicos, su relativamente alto punto de fusión entre los 252 y 260°C, su baja densidad de aproximadamente 1.33 gr/cm³ y su facilidad de manipulación sobre todo al incrementar la temperatura. Aunadas a las características del zinc mencionadas en MaTeck's (2006), relativas a su maleabilidad, a su densidad de 7.133 g/cm³, a su particularmente bajo punto de fusión de 419.58°C, que le permite moldearse a temperaturas moderadas que generan ahorros energéticos y de proceso considerables.

Características que en conjunto permiten obtener **materiales** ligeros, fácilmente manipulables, con buen acabado superficial y un bajo costo de proceso por emplear materiales reciclados, además de la baja relación tiempo temperatura de proceso. Generando materiales que pueden servir para elementos de empaque, paneles decorativos o incluso como losetas.

1.2.2.- Metodología.-

1.2.2.1.- Descripción del método.-

La técnica a emplear para la preparación de los materiales es una técnica de **polvos** que se basa en 3 etapas fundamentales: Primero los polvos son **mezclados** y molidos a una velocidad y tiempo definido, para posteriormente **compactarlos** con ayuda de un dado de acero con las dimensiones requeridas de acuerdo a las probetas deseadas, en una prensa hidráulica uniaxial, y por último se **sinterizan** isotérmicamente (la mufla debe haber alcanzado la temperatura de operación antes de que las muestras sean ingresadas, y una vez transcurrido el tiempo definido se retiran de la mufla y se dejan enfriar a temperatura ambiente).

1.2.2.2.- Preparación de los materiales.-

Con el fin de fabricar las probetas necesarias para realizar las pruebas y ensayos contemplados, fue necesario primero generar el **polvo** de PET reciclado (rPET) a partir de botellas de desperdicio. Éste fue obtenido por molido mecánico, tamizando el polvo para uniformizar la partícula en un tamaño máximo de 420 μm .

Posteriormente el polvo fue mezclado con **partículas** de zinc de entre 1 a 5 μm , con pureza de 99.7%, (QuimiNet, México), empleando un molino de rodillo y un recipiente de alta alúmina con elementos de molienda de zirconia estabilizada en una relación de 1 a 15. Efectuando la molienda a una velocidad de 375 + 5 rpm, por 3 horas y empleando una proporción de 5 y 40% de zinc en peso, respectivamente.

1.2.2.3.-Fabricación de las probetas.-

Partiendo de los polvos previamente preparados se fabricaron comprimidos en forma de **pastilla** con ayuda de un dado de acero de 20mm de diámetro interno, cuantificando 2g de polvo por comprimido para las mediciones de densidad aparente, absorción de agua y dureza. También se fabricaron **probetas** rectangulares de 10 X 10 X 70mm para los ensayos de flexión e impacto, con ayuda de un dado de acero apropiado para estas dimensiones. Además se fabricaron probetas para el ensayo de compresión usando un dado de acero en forma cilíndrica en una proporción de 1 a 1, con diámetro de 10 mm. Usando en todos los casos 3 probetas para cada ensayo.

Así mismo, todas las probetas independientemente de la forma se compactaron en una prensa hidráulica uniaxial a 180 + 5 MPa y se sinterizaron isotérmicamente a 256 + 1°C por 10, 15 y 20 minutos en una mufla Lindberg, modelo 51894, la cual alcanza una temperatura máxima de 1100°C.

1.2.2.4.- Técnicas de caracterización.-

Se indican las diferentes caracterizaciones aplicadas en la muestras.

Caracterización física.

- ρ , Densidad aparente: por el método de Arquímedes AH₂O, Absorción de agua (D 570 ASTM 1984, aplicada en pruebas de absorción de agua en plásticos)

Caracterización mecánica.

- D, Dureza (Shore D)
- RC, Resistencia a la compresión (D 695 ASTM 1984, aplicada en pruebas de compresión para plásticos rígidos)
- RF, Resistencia a la flexión (D 790 ASTM 1984, aplicada para pruebas de flexión en compuestos con matriz polimérica)
- RI, Resistencia al impacto (IZOD) (D 256 ASTM 1984, aplicada en pruebas de resistencia al impacto por el método Izod)

Caracterización microestructural.

- MO, Microscopía óptica
- ME, Microscopía estereoscópica

1.2.3.- Resultados y discusiones.-

1.2.3.1.- Medición de la densidad aparente.-

Los valores de **densidad aparente** que se muestran en la gráfica de la figura 1, se obtuvieron por el método de Arquímedes, con el auxilio de una balanza de densidades (Ohaus, mod. 311).

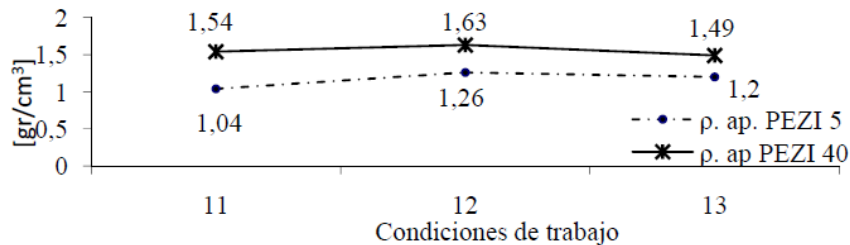


Figura 1.- Densidad aparente.

En la gráfica de la figura 1 se puede observar que la curva asociada al material con mayor contenido de zinc (PEZI40), considerando los tres tiempos evaluados, presenta mayores valores de densidad. Este comportamiento es totalmente esperado, debido a la gran diferencia entre los valores de densidad de los elementos constitutivos de la mezcla, pues la densidad del zinc, es poco más de cinco veces la del PET según los valores del Departamento de Química Orgánica (DQO-UV, 2011), y de MaTecK's (2006).

Así mismo, se puede notar que en ambas curvas la tendencia inicial es a crecer conforme aumenta el tiempo de proceso. Éste comportamiento puede estar relacionado al coeficiente de conductividad térmica que según TET (2010) y Rubio (2005) es de 120 W/mK el del Zn, que es muy superior al rango de 0.15-0.5 W/mK del PET, lo que puede provocar que al haber un mayor contenido de metal en la muestra, el calor se difunda más uniformemente a través de todo el compacto, favoreciendo la **homogeneidad** en el proceso de sinterizado. Sin embargo, al exceder el tiempo ideal de trabajo para cada mezcla, se inicia una disminución en la densidad aparente, que puede ser originada por la presencia de cierta porosidad, pues al unirse las partículas poliméricas quedan espacios libres generados al difundirse las partículas de metal, los cuales disminuyen la densidad. Por lo que el mejor comportamiento en ambos casos, se da en las muestras sinterizadas por **15 minutos**.

1.2.3.2.- Porcentaje de absorción de agua.-

Para conocer el porcentaje de **absorción de agua**, primero se pesaron las muestras en seco, con una balanza Ohaus mod. 311, y después de mantenerlas sumergidas por 24 h a 22+1°C se volvieron a pesar eliminando tan solo el agua superficial.

La figura 2 muestra el porcentaje de absorción de agua en función del tiempo de sinterización y de la cantidad de zinc empleado.

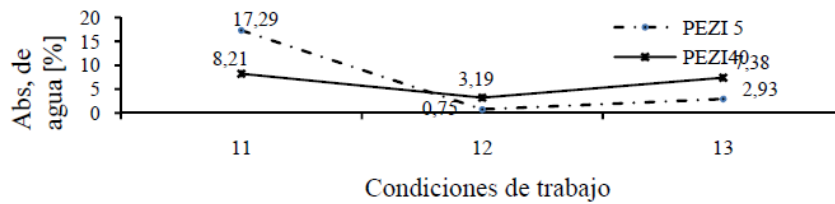


Figura 2.- Absorción de agua.

La mayoría de las muestras presentan altos porcentajes de absorción de agua, ya que en los polímeros en general estos valores oscilan acorde al IMPI (2000), entre 0.01-1.5%. Ya que la presencia del metal puede mejorar la resistencia, pero también interfiere en la unión interparticular del polímero. No obstante, a pesar de este hecho, al trabajar en el **tiempo intermedio** de proceso donde seguramente se logra el mejor equilibrio entre unión de partículas de rPET y difusión del zinc se obtienen valores que incluso en el caso del material con menor cantidad de metal están dentro del rango mencionado. Lo cual es un buen **resultado** considerando que la técnica empleada por no alcanzar el punto de fusión del polímero tiende a generar mayor presencia de porosidad aparente. De tal forma que al trabajar en 15 minutos se obtiene el mejor resultado.

1.2.3.3.- Medición de la dureza shore D.-

Para realizar la medición de la **dureza** shore D, se empleó un durómetro mod. TH210 especial para materiales poliméricos, con el cual se obtiene el resultado por contacto directo del indentador con la muestra. El promedio obtenido de 10 mediciones por muestra, sirvió como base para trazar la gráfica de la figura 3.

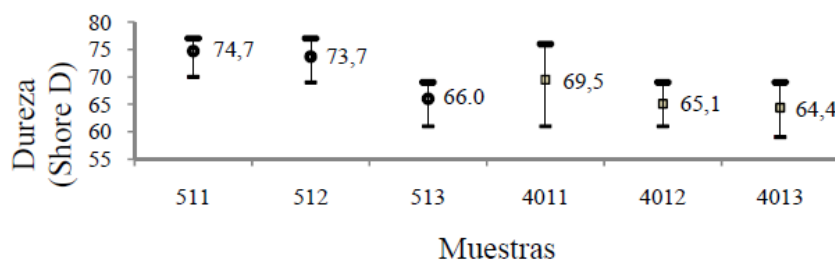


Figura 3.- Dureza.

Al comparar los resultados de ambas familias de materiales mostrados en la gráfica de la figura 3, se puede notar que la dureza está en función del **contenido** de metal presente en las muestras, ya

que menor contenido implica mayor dureza en el material. Así mismo, conforme se incrementa el tiempo de proceso, la dureza desciende en ambos materiales. Obteniendo valores que oscilan entre un 12 a 26% menores que los reportados por industrias JQ. (2011), los cuales son de entre 85 – 87 shore D. Esta disminución en la dureza puede estar relacionada con la porosidad aparente del material, que aunque es baja se aprecia en las micrografías por microscopía óptica mostradas en las figuras 6 y 7. Pues conforme se **incrementa** la carga de partículas metálicas, aunque exista mayor homogeneidad, la difusión en el zinc genera la presencia de espacios vacíos, los cuales provocan que la dureza **decrezca**. Además de que al incrementar el tiempo de proceso, los espacios vacíos se multiplican al difundirse el zinc en sí mismo, lo cual favorece aún más el decremento en la dureza.

Al comparar estos resultados, se puede ver que en dos de las tres propiedades analizadas, las muestras sinterizadas por **15 minutos** generan los mejores resultados. Por lo que se escogerán las muestras PEZI 512 y PEZI 4012 para continuar el estudio.

1.2.3.4.-Ensayo de compresión.-

Para este ensayo se ocuparon las probetas previamente preparadas en las dos concentraciones de estudio, con dimensiones de 10 mm de diámetro por 10 mm de altura, empleando la máquina universal para ensayos Monsanto, y aplicando una carga de 125 Kg. Los resultados se pueden observar en la gráfica de la figura 4. Al observar las curvas correspondientes a las muestras PEZI512 y PEZI4012, se puede notar que a pesar de tener una resistencia a la compresión muy semejante el porcentaje de deformación que presentan hasta antes de la ruptura es diferente, esto debe estar provocado por el **comportamiento** del material polimérico que es más elástico que el metal, de tal forma que se puede apreciar una **relación** directa entre rigidez y contenido de zinc.

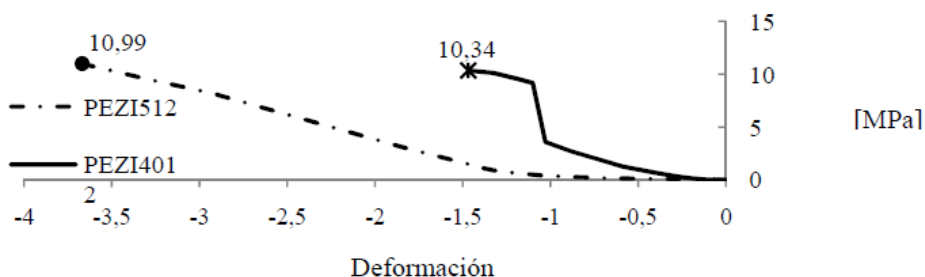


Figura 4.- Resistencia a la compresión.

1.2.3.5.- Ensayo de flexión.-

Para realizar el ensayo de **flexión** se ocuparon las probetas previamente fabricadas, las cuales se ensayaron en una máquina universal marca United, a una velocidad de 0.2 plg/min. De tal forma que los resultados sirvieron para graficar las curvas de la figura 5, donde se puede notar que el comportamiento de ambas curvas es similar y corresponde a un comportamiento propio de **materiales frágiles**. Éste comportamiento es debido a que la deformación plástica antes de la ruptura es prácticamente inexistente. Aunque este comportamiento similar al de los materiales cerámicos es de esperar por la técnica de producción basada en tecnología de **polvos**.

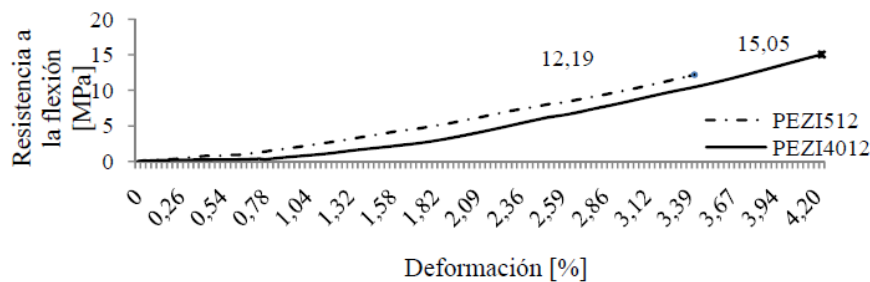


Figura 5.- Resistencia a la flexión.

Así mismo, es de notar que conforme se **incrementa** el contenido de metal en la muestra, ésta tiende a incrementar su resistencia a la flexión y a soportar mayor deformación antes de la fractura, por lo que debido a este comportamiento se puede notar que las partículas de zinc ejercen su función de **refuerzo**, incrementando la resistencia del material.

1.2.4.- Conclusiones.-

A través de la metodología propuesta se fabricaron de manera **exitosa** materiales compuestos ligeros, con buenas características físicas y mecánicas, mismos que fueron obtenidos a partir de PET reciclado reforzado con partículas de ZINC. Del comportamiento físico y mecánico de estos materiales se puede decir que al trabajar a cierta temperatura (256°C), en la superficie se generan **uniones** fuertes entre las partículas de polímero, la cual pudo ser observada en las micrografías obtenidas por microscopía óptica. Aunque esta **porosidad** también se da en el cuerpo de la muestra, no obstante resulta ser **menor** al aumentar el contenido de partículas metálicas como se pudo observar en las micrografías obtenidas, debido a la mayor densidad del metal, a la diferencia en el punto de fusión, y sobre todo al coeficiente de conductividad térmica muy superior del metal. De tal forma que la superficie al recibir directamente el calor de la mufla después de cierto tiempo de proceso y sin exceder el ideal, tiende a **uniformizarse** generando sobre todo en el material con menor contenido de metal

una capa protectora que limita la absorción de agua. A la vez esta unión interparticular superficial de polímero da origen a una matriz más homogénea que incrementa la dureza.

Así mismo, acorde a las micrografías obtenidas por estereoscopia, se puede hablar de un comportamiento **frágil**, es decir se trata de un material rígido, el cual puede soportar esfuerzos de flexión e impacto con ayuda de las partículas metálicas que por ser más dúctiles que la **matriz polimérica** absorbe mejor la energía generada durante la aplicación de la carga, lo cual no ocurre cuando se comprime el material, ya que la carga es absorbida principalmente por el polímero.

De tal forma que acorde con estos resultados se puede decir que el metal favorece el comportamiento del material, incrementando la resistencia del mismo, por lo que aquel que tiene el mayor contenido de zinc es el que ofrece el mejor comportamiento mecánico y microestructural.

1.3.- Breve introducción a la arquitectura reciclable.-

La preocupación por la relación entre el hombre y el medio ambiente ha puesto la atención de muchos arquitectos en realizar una **arquitectura** diferente y ecológica, la cual programa, proyecta, realiza, utiliza, demuele, recicla y construye edificios sostenibles. Esta arquitectura contiene diez principios básicos:

- Valorar las necesidades.
- Proyectar la obra de acuerdo al clima local.
- Ahorrar energía.
- Construir edificios de mayor calidad.
- Evitar riesgos para la salud.
- Utilizar materiales obtenidos de materias primas generadas localmente.
- Utilizar materiales reciclables.
- Gestionar ecológicamente los desechos.
- Pensar en fuentes de energía renovables.
- Ahorrar agua.

El **reciclaje** es un proceso que utiliza ciertos materiales, por lo general no biodegradables, considerados "basura", como: papel, cartón, plástico, metales, residuos orgánicos y otros, al fin de

reintegrarlos al ciclo económico, reutilizándolos o aprovechándolos como **materia prima** para nuevos productos, con lo que podemos lograr varios **beneficios** económicos, ecológicos y sociales:

- Bajar la contaminación ambiental.
- Crear fuentes de trabajo.
- Materia prima secundaria a bajo precio.
- Disminuye la cantidad de desechos.

La arquitectura reciclable es **sustentable** ya que busca optimizar recursos disminuyendo el impacto ambiental. Desde el ámbito económico se puede reducir gastos enfrentando el material habitual para construcción con los nuevos materiales que están resultando del reciclaje. Las principales **fuentes** de generación de estos materiales son:

- Los hogares.
- El comercio.
- Instituciones, establecimientos educativos, oficinas y compañías.
- La industria productora.

Según este estudio, el 82% de los hogares bota la basura en basureros públicos cuando se encuentra fuera de su hogar, mientras el 12,6% arroja la basura en la calle. Así también, el 25,9% de los hogares ecuatorianos tienen capacitación sobre reciclaje, siendo Azuay con el 40,3% la provincia con mayor porcentaje en el conocimiento de este tema. El 24,5% de los hogares en Ecuador utiliza productos reciclados, siendo la Costa la región con mayor porcentaje en la utilización de estos productos con el 26,2% de los hogares.

Estas cifras demuestran que en nuestro país todavía existe un bajo porcentaje de manejo y reutilización de los desechos, por ello en la presente tesis se realiza un estudio para buscar una nueva alternativa de uso sobre todo en lo que tiene que ver al plástico reciclado.

Según el INEC el 84,8% de los hogares ecuatorianos no clasifica los desechos orgánicos, el 82,5% no clasifica los plásticos y el 80,4% no clasifica el papel; esta encuesta fue realizada en diciembre de 2010 a 21.678 hogares a nivel nacional en 579 centros poblados urbanos y rurales.

2.- ARCILLA COMO MATERIAL.-

La **arcilla**, es un mineral procedente de la descomposición de rocas ígneas contiene Feldespato, como el granito, se presenta en terrenos llamados estratificados generalmente en capas muy regulares. La arcilla es una sustancia mineral plástica compuesta principalmente de silicatos de aluminio hidratados.

Pueden ser de dos clases, según su procedencia:

- **Primarias o residuales:** Formadas en el lugar donde se originó, o sea, donde se desintegró la roca. Contienen partículas sin ninguna clasificación: desde caolinizadas hasta fragmentos de rocas y minerales duros e inalterados. Por su heterogeneidad no son de mucha aplicación en la industria cerámica.
- **Secundarias o sedimentarias:** Han sido transportadas después de su formación por fuerzas químicas o físicas y depositadas en pantanos, lagos, o el océano, etc. Están clasificadas por tamaño debido al transporte. Tienen mejores condiciones para la industria cerámica.

2.1.- Propiedades Físicas de las arcillas.-

- **Elasticidad:** Producida por la mezcla de la arcilla con una adecuada cantidad de agua.
- **Endurecimiento:** Lo sufren a ser sometidas a la acción de calor.
- **Color:** este se debe a la presencia de óxidos metálicos.
- **Absorción:** Absorben materiales tales como aceites, colorantes, gases.

2.2.- Propiedades químicas de las arcillas.-

La arcilla pura es bastante **resistente** a la acción química de los **reactivos**; sin embargo, es atacada por algunos reactivos, sobre todo si se le aplican en condiciones apropiadas de presión, temperatura y concentración.

El ácido clorhídrico y el sulfúrico concentrados la descomponen a una temperatura de 250 a 300° C y actúan más lentamente sobre arcilla calcinada.

Algunos álcalis como sosa y potasa atacan el silicato aluminico si hay calentamiento prolongado y la transforman en silicatos dobles de sodio o potasio y aluminio.

El anhídrido bórico la transforma en una masa vítrea (vitrificado) más atacable por los reactivos químicos.

Con mayor facilidad actúa el ácido fluorhídrico y los fluoruros ácidos formando fluoruro de Aluminio y de Silicio.

Para la industria cerámica, las propiedades más importantes son las relacionadas con las **reacciones** efectuadas entre los diferentes silicatos de la arcilla para formar compuestos de ciertas características como resistencia, dureza, aumento de densidad, disminución de absorción, según la reacción que haya tenido lugar.

2.3.- Acción del calor sobre las arcillas.-

- La eliminación del **agua** higroscópica se da a una temperatura de aproximadamente 100° C, aún no pierde su agua de composición y conserva la propiedad de dar masas plásticas.
- Con una **temperatura** entre 300 y 400° C el agua llamada de combinación es liberada, perdiendo la propiedad de dar masas plásticas aunque se le reduzca a polvo y se le añada suficiente agua.
- Entre 600 y 700° C el **agua** en la arcilla es totalmente eliminada.
- Por la acción del **calor** entre 700 y 800° C adquiere propiedades tales como dureza, contracción y sonoridad, la sílice y la alúmina comienzan a formar un silicato anhidro (Mullita: $Al_2O_3 SiO_2$).
- Esta combinación se completa al parecer entre 1100 y 1200° C.
- Hacia los 1500° C aparecen los primeros síntomas de vitrificación.

2.4.- Coloración.-

Esta se debe a la presencia de óxidos metálicos, principalmente el de **hierro** (por su actividad y abundancia). Dependiendo de si la llama es oxidante o reductora se colorea de rojo, amarillo, verde o gris.

2.5.- El ladrillo tradicional.-

El ladrillo de arcilla, constituyó el principal material de la construcción en las antiguas Mesopotamia y Palestina, donde apenas se disponía de madera y piedras. Los habitantes de Jericó en Palestina fabricaban ladrillos desde hace unos 9000 años. Los constructores sumerios y babilonios levantaron zigurats, palacios y ciudades amuralladas, con ladrillos secados al sol, que recubrían con otros ladrillos cocidos en hornos, más resistentes y a menudo con esmaltes brillantes formando frisos decorativos. En sus últimos años los persas construían con ladrillos, al igual que los chinos, que

levantaron la gran muralla. Los romanos construyeron baños, anfiteatros y acueductos con ladrillos, a menudo recubiertos de mármol.

En el curso de la edad media, en el imperio bizantino, al norte de Italia, en los Países Bajos y en Alemania, así como en cualquier otro lugar donde escaseara la piedra, los constructores valoraban el ladrillo por sus cualidades decorativas y funcionales. Realizaron construcciones con ladrillos templados, rojos y sin brillo, creando una amplia variedad de formas, como cuadros, figuras de punto de espina, de tejido de esterilla o lazos flamencos. Esta **tradicción** continuó en el renacimiento y en la arquitectura georgiana británica, y fue llevada a América del norte por los colonos. El ladrillo ya era conocido por los indígenas americanos de las civilizaciones prehispánicas. En regiones secas construían casas de ladrillos de adobe secado al sol. Las grandes pirámides de los olmecas, mayas y otros pueblos fueron construidas con ladrillos revestidos de piedra. Pero fue en España donde por influencia musulmana, el uso del ladrillo alcanzó más difusión, sobretodo en Castilla, Aragón y Andalucía.

El **ladrillo industrial**, fabricado en enormes cantidades, sigue siendo un material de construcción muy versátil. Existen tres clases: ladrillo de fachada o exteriores, cuando es importante el aspecto; el ladrillo común, hecho de arcilla de calidad inferior destinado a la construcción; y el ladrillo refractario, que resiste temperaturas muy altas y se emplea para fabricar hornos. Los ladrillos se hacen con argamasa, una pasta compuesta de cemento, masilla de cal y arena.

Hasta principios del siglo XIX prácticamente todos los ladrillos se moldeaban a mano y a la manera tradicional, pero del mismo modo que otros sectores fueron mecanizados, los ingenieros y fabricantes se centraron en la búsqueda de **sistemas mecánicos** para la fabricación de ladrillos con la esperanza de reducir costo e incrementar la producción.

Clases de unidades, el uso o función principal de cualquier tipo de unidad de mampostería determina la clase a que corresponde y los requisitos físicos que debe cumplir. Para efectos de esta norma, se consideran las unidades estructurales (portantes) y las unidades no estructurales (divisorios o de cierre); y las unidades de mampostería de uso exterior, o de fachadas, y las unidades de uso interior.

Geometría, Su forma es la de un prisma rectangular, en el que sus diferentes dimensiones permiten combinarlos libremente. El espesor, por el contrario, puede no estar modulado. Existen diferentes formatos de ladrillos, por lo general de un tamaño que permita manejarlo con una mano. En particular, destaca el formato *métrico*, en el que las dimensiones son 24 x 11,5 x 5,25 cm.

3.- PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DE LAS LADRILLERAS.-

Actualmente la contaminación ambiental es uno de los problemas más graves de **Salud Pública** que se presentan a nivel mundial. Por esto, es de primordial interés crear en las personas un conocimiento y una conciencia del problema de contaminación producida por la producción de ladrillos.

Los diferentes tipos de contaminaciones han causado millones de muertes de personas en especial niños. Según datos de la UNICEF y la OMS en el año 1993, el 28% (3.6 millones) de defunciones infantiles que ocurren en el mundo están causados por IRAS (**Infecciones Respiratorias Agudas**). Y el 23% (3 millones) de niños, murieron por EDAS (**Enfermedades Diarreicas Agudas**), causada por la deshidratación. Por ejemplo en países desarrollados, el asma está creciendo y los factores ambientales como la **contaminación atmosférica** y los alérgenos de las casas parecen ser en parte culpables. Más de 100 millones de personas en Europa y Norteamérica están aún expuestos a una atmósfera insalubre, entre estas los niños, son los más afectados. Por otro lado, en países en desarrollo las muertes están relacionadas a **situaciones ambientales**, como por ejemplo en América Latina: 4 millones de niños mueren al año por IRAS, relacionadas con la contaminación atmosférica, tanto en lugares cerrados (cocina a leña), como en lugares externos (industria). Se muestra una relación entre los datos de salud, de los habitantes de las zonas de producción de ladrillos.

3.1.- Fabricación artesanal.-

La fabricación de ladrillos, tejas y otros productos de arcilla cocidos de forma artesanal, se ha convertido en un problema ecológico en muchos países, debido al tipo de **combustibles** que se utilizan para la cocción de esos productos: leña, llantas, madera, plásticos o textiles, entre otros, al ser **quemados**, emiten una gran cantidad de gases a la atmósfera, como monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, bióxido de azufre y partículas sólidas. Por ello es, el problema de las **fuentes emisoras** de estos gases, la principal causa de **contaminación atmosférica**.

La gran mayoría de ladrilleras de micro y pequeño tamaño presentan un alto grado de **informalidad** y utilizan **técnicas artesanales** para la fabricación de sus productos. La planta de fabricación está representada básicamente por el **horno** y un espacio de terreno como patio de labranza. Las ladrilleras artesanales emplean hornos fijos de fuego directo, techo abierto y tiro ascendente para la cocción también denominada quemado o simplemente quema de ladrillos.

El uso de estos últimos materiales como combustible genera emisiones de **gases altamente tóxicos y cancerígenos** como óxidos de azufre (SOx), óxidos de nitrógeno (NOx), compuestos orgánicos

volátiles (COV), hidrocarburos aromáticos poli nucleares, dioxinas, furanos, benceno, bifenilos poli clorados y metales pesados como As, Cd, Ni, Zn, Hg, Cr, V, etc., estos elementos y compuestos provocan irritación a la piel, ojos y membranas mucosas, trastornos en las vías respiratorias, en el sistema nervioso central, depresión y eventualmente cáncer; características que los hacen inaceptables para ser utilizados con este fin.

3.2.- Contaminación ambiental.-

Se conoce como contaminación ambiental a la presencia en el medio ambiente de uno o más, **contaminantes** en cantidades superiores a los límites tolerados por el ser humano, combinados de tal manera que en mayor o menor medida causan un desequilibrio ecológico y dañan la **salud** y el **bienestar** del hombre.

La contaminación ambiental es también la incorporación de **sustancias** o sus combinaciones, compuestos o derivados químicos o biológicos, humos, gases, polvos, cenizas, bacterias, residuos y desperdicios, así como también las formas de **energía** como el calor, la radioactividad y el ruido que al entrar en contacto con el aire, agua o suelo, altere o modifique su composición y condiciones naturales.

Los principales medios contaminados son el aire, el agua y el suelo.

3.2.1.- Contaminación del aire.-

La contaminación de aire hace referencia a la alteración de la **atmósfera** terrestre por la adición de gases, partículas sólidas o líquidas en suspensión en proporciones distintas a las naturales. Este tipo de contaminación se da primordialmente por los **escapes de gases** de los motores de combustión interna, las calefacciones, a las industrias que liberan gases, **vapores** y **partículas sólidas** capaces de mantenerse en suspensión en la atmósfera, con valores superiores a los normales, que son perjudiciales a la vida y la salud tanto del ser humano como los animales y las plantas.

El aumento de **dióxido de carbono** en la atmósfera se debe a la combustión del carbón y del petróleo; lo que lleva a un calentamiento del aire y los mares lo cual produce un desequilibrio químico en la tierra, produciendo cantidades altas de monóxido de carbono que es sumamente dañino para los seres vivos.

La contaminación de aire afecta la salud de los seres humanos y se manifiesta con enfermedades tales como:

- Irritación de ojos.
- Irritación de las vías respiratorias.
- Enfermedades broncopulmonares (asma, enfisema pulmonar).

3.2.2.- Contaminación del agua.-

Esta contaminación ha adquirido importancia debido al aumento de la población y al incremento de los agentes contaminantes que el propio **hombre** ha creado. Las fuentes de contaminación son el resultado indirecto de las **actividades** domésticas, industriales, agrícolas, ríos y canales que son contaminados por los desechos del alcantarillado, desechos industriales, detergentes, abonos y pesticidas que escurren de las tierras agrícolas.

3.2.3.- Contaminación del suelo.-

La contaminación del suelo es la **presencia** de compuestos químicos hechos u otra **alteración** al ambiente natural del mismo. Esta contaminación generalmente aparece al producirse una ruptura de tanques de almacenamiento subterráneo, aplicación de pesticidas, filtraciones de rellenos sanitarios o de acumulación directa de productos industriales. Los químicos más comunes incluyen hidrocarburos derivados del petróleo, solventes, pesticidas y metales pesados.

3.2.4.- Contaminación atmosférica.-

Es la **presencia** de contaminantes o las combinaciones de los mismos en la atmósfera, que causa alteraciones tanto en el ambiente como en los seres humanos, animales y plantas.

De la misma forma de acuerdo a la Ley del Medio Ambiente en Perú, Ley 1333: “Presencia en la atmósfera de uno o más contaminantes, de tal forma que se generen o puedan generar efectos nocivos para la vida humana, la flora o la fauna, o una degradación de la calidad del aire, del agua, del suelo, los inmuebles, el patrimonio cultural o los recursos naturales en general.”

3.3.- Tipos de contaminantes originados por ladrillera artesanal.-

La **materia prima** para la fabricación de ladrillos no contiene elementos contaminantes porque está constituida básicamente por arcilla con agua y el proceso de cocción consiste en eliminar el exceso de agua de la masa de ladrillo cruda hasta el punto de sintonización de la arcilla donde comienzan los cambios químicos de sus componentes para darle las características de compactación y resistencia.

La industria ladrillera emplea para la manufactura de sus productos **combustibles** altamente contaminantes como llantas, aceites gastados, madera, aserrín, residuos industriales y material orgánico de desecho. Es por eso que los **agentes contaminantes** de las emisiones gaseosas de este sector productivo son casi en su totalidad los que están presentes en el combustible que se utiliza para la cocción, cuyos componentes son los siguientes:

- SO₂.
- NO₂.
- Aceites y grasas.
- Partículas sólidas (barro ò arcilla).
- H₂SO₄.
- H₂S.

4.- RESIDUOS SÓLIDOS EN LA ARGENTINA.-

Según lo publicado por la secretaria de ambiente y desarrollo sustentable (SAyDS) en nuestro país no se llevan estadísticas detalladas respecto a la cuantificación, caracterización, evolución de la generación y demás aspectos vinculados al manejo de los **residuos sólidos urbanos** (RSU), como así tampoco se han realizado estudios extensivos que abarquen o puedan ser **representativos** para todo el territorio, con excepción de uno llevado a cabo por la Organización Panamericana de la Salud (OPS) en 2002.

La tarea de establecer una línea de base de las variables e indicadores asociados a los RSU, demandó a la SAyDS a recurrir a diversas fuentes y vincular distintos tipos de información. En Argentina, esta tarea se dificulta, ya que son escasos los **organismos** que tienen los datos organizados en bases compatibles, y son más los que los presentan dispersos o directamente no los poseen, lo cual obliga a realizar abstracciones inferencias y procesamientos manuales.

El estudio de **antecedentes** realizado en el marco de la preparación de la ENGIRSU, se basó fundamentalmente en un relevamiento de nuevos datos, obtenidos en forma directa a través de visitas y entrevistas con funcionarios municipales.

En el marco de la preparación de la ENGIRSU se llevó a cabo un relevamiento de datos *ad hoc* en 19 provincias argentinas, que involucró la visita a 83 municipios. Se excluyeron del relevamiento directo aquellos que están bajo la órbita del **CEAMSE** y también los que pertenecen a las provincias de Córdoba, Entre Ríos, La Rioja y Mendoza, dada la existencia de estudios específicos desarrollados en esas cuatro provincias. De este modo se conformó una muestra de 376 municipios, abarcando una población de 12,6 millones de habitantes.

Si bien partieron de una base **muestral** no suficiente para realizar inferencias estadísticas para algunas de las variables de interés, se extendió la información a través de la combinación y extrapolación con otros estudios de mayor profundidad realizados para ciertas regiones, y del complemento con otros aportes de diversas fuentes de información.

Respecto a la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y a los municipios de la Provincia de Buenos Aires que se encuentran regionalizados bajo la operación del CEAMSE, a los fines del procesamiento de la información, la SAyDS los consideró en forma independiente a la muestra referida, dado que en este caso sí se contaba con algunas estadísticas detalladas.

4.1.- Demografía.-

La generación de RSU está íntimamente relacionada con la cantidad de habitantes del área. Por otro lado para poder implementar una adecuada GIRS es importante determinar de qué forma están **distribuidos** dichos habitantes, dado que las distancias entre municipios y la generación de residuos en cada uno de ellos son datos fundamentales para aplicar políticas de regionalización.

La tabla siguiente muestra la división política, la distribución de la población por provincia, la superficie de cada una de ellas y la correspondiente densidad poblacional.

Se tomaron como datos poblacionales de base las proyecciones efectuadas por el INDEC en base al CENSO 2001 para los años subsiguientes hasta el 2015.

PROVINCIA	SUPERFICIE KM²	2005		2010		2015	
		POBLACION	DENSIDAD	POBLACION	DENSIDAD	POBLACION	DENSIDAD
		HAB	HAB/KM²	HAB	HAB/KM²	HAB	HAB/KM²
Total del país	2.780.403	38.592.150	13,88	40.518.951	14,57	42.403.087	15,25
Ciudad de Bs As	203	3.018.102	14.867,50	3.058.309	15.065,56	3.090.922	15.226,22
Buenos Aires	307.571	14.654.379	47,65	15.315.842	49,80	15.940.645	51,83
Catamarca	102.602	365.323	3,56	404.240	3,94	444.824	4,34
Córdoba	165.321	3.254.279	19,68	3.396.685	20,55	3.531.817	21,36
Corrientes	88.199	980.813	11,12	1.035.712	11,74	1.091.889	12,38
Chaco	99.633	1.024.934	10,29	1.071.141	10,75	1.119.667	11,24
Chubut	224.686	445.458	1,98	470.733	2,10	494.904	2,20
Entre Ríos	78.781	1.217.212	15,45	1.282.014	16,27	1.345.355	17,08
Formosa	72.066	517.506	7,18	555.694	7,71	597.418	8,29
Jujuy	53.219	652.577	12,26	698.474	13,12	744.560	13,99
La Pampa	143.440	321.653	2,24	341.456	2,38	360.694	2,51
La Rioja	89.680	320.602	3,57	355.350	3,96	391.614	4,37
Mendoza	148.827	1.675.309	11,26	1.765.685	11,86	1.852.017	12,44
Misiones	29.801	1.029.645	34,55	1.111.443	37,30	1.197.823	40,19
Neuquén	94.078	521.439	5,54	565.242	6,01	608.090	6,46
Río Negro	203.013	587.430	2,89	603.761	2,97	617.216	3,04
Salta	155.488	1.161.484	7,47	1.267.311	8,15	1.379.229	8,87
San Juan	89.651	666.446	7,43	715.052	7,98	762.857	8,51
San Luis	76.748	409.280	5,33	456.767	5,95	505.730	6,59
Santa Cruz	243.943	213.845	0,88	234.087	0,96	254.629	1,04
Santa Fe	133.007	3.177.557	23,89	3.285.170	24,70	3.386.133	25,46
Santiago del Estero	136.351	839.767	6,16	883.573	6,48	930.535	6,82
Tierra del Fuego	21.571	115.286	5,34	133.694	6,20	152.979	7,09
Tucumán	22.524	1.421.824	63,12	1.511.516	67,11	1.601.540	71,10

Fuente: Elaboración propia en base a datos ENGIRSU 2005 – INDEC 2001 y proyecciones.

Tabla 1.- Densidad poblacional en la Argentina.

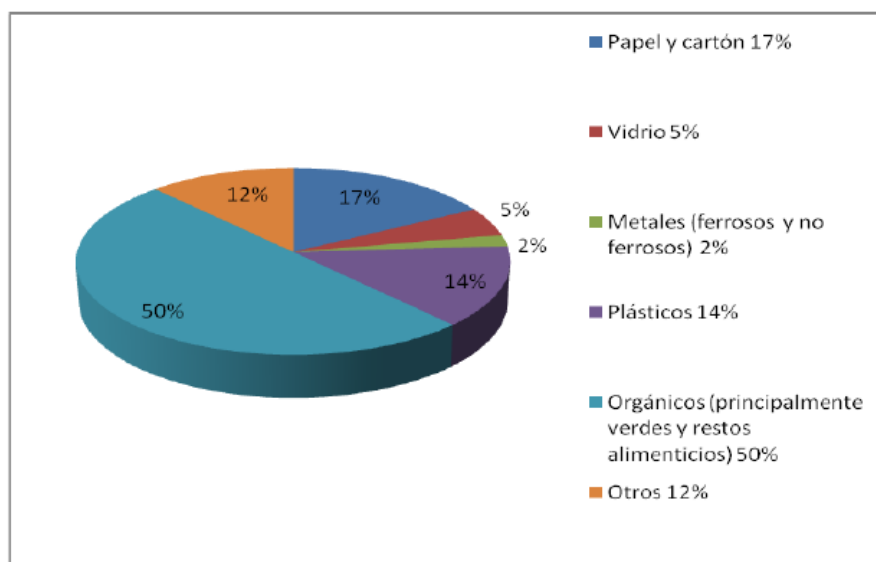
Como se puede observar en la tabla precedente en muchos casos podríamos decir que la cantidad de habitantes es inversamente proporcional a la superficie del área de estudio. Esta situación es una de las **complicaciones** que presenta nuestro país a la hora de diagramar la gestión de residuos. La distancia a recorrer para el depósito de los RSU es inversa a la generación que se presenta en dichos lugares.

Por otro lado al tratarse de un país tan extenso y con disparidad en la distribución de sus habitantes es difícil en muchos casos tratar de implementar la **regionalización** en la gestión de residuos y será necesario enfocar soluciones individuales para cada municipio.

4.2.- Composición física.-

La caracterización física de los residuos se encuentra vinculada principalmente a factores socio-económicos los cuales se han ido **modificando** sensiblemente en los últimos tiempos, por tal motivo no es posible extraer conclusiones taxativas respecto a la composición física de los RSU, dado que no se cuenta con un estudio global como el efectuado para la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Sin embargo en el marco de la ENGIRSU se han analizado todos los datos disponibles para distintas localizaciones y momentos del país, se encuentra que algunos de los materiales presentes en los RSU corresponden a **valores** que pueden considerarse típicos dentro de un rango de variación, como se observa en el gráfico siguiente.



Fuente: Elaboración propia en base informe ENGIRSU 2005

Figura 6.- Composición de los residuos sólidos en la Argentina.-

Teniendo en cuenta los datos anteriores y las estimaciones efectuadas por diversos organismos, como es el caso del estudio efectuado por la OPS en el 2002, podemos consignar que los RSU en el país, en promedio, tienen una humedad superior al 50%. Este dato es de suma relevancia a la hora del estudio de alternativas de tratamiento y disposición final de los RSU.

Asimismo los porcentajes anteriores indican que una fracción importante de los residuos generados en el país puede considerarse posible de reciclar, siendo estos el plástico, papel y cartón y vidrio en menor medida.

4.3.- Tratamiento: compostaje y reciclado.-

De acuerdo a lo publicado en la ENGIRSU las prácticas de reciclado y compostaje de carácter formal, en general están más **difundidas** en las ciudades pequeñas. No obstante, se menciona que las tres áreas metropolitanas más grandes del país tienen instalaciones para producir compost (Buenos Aires, Córdoba y Rosario).

En el territorio nacional se encuentra que un interesante porcentaje, alrededor del 15%, de las localidades más pequeñas (entre 2.000 y 10.000 habitantes), tiene **recolección selectiva y plantas de recuperación** para reciclado y compost, siendo creciente el número de comunidades que adhieren a este tipo de manejo, dándose para ello un alto nivel de participación de la población [OPS, 2002 – PNVR].

Como observamos en el punto anterior, existe una importante fracción valorizable presente en los RSU de nuestro país. Si bien la lista de materiales potencialmente **recuperables** es importante, en general en el país se trabaja, mayormente de manera informal, con papel y cartón, vidrio, plásticos (PEDA y PET), aluminio y chatarras.

No debe perderse de vista, asimismo, que el contexto macroeconómico y las fluctuaciones propias de cada uno de los potenciales **mercados**, inciden fuertemente en la posibilidad de recuperar residuos para su efectiva valorización.

La recuperación y aprovechamiento de materiales de los residuos se vería favorecida si se implementaran **políticas** de manejo y segregación en origen por parte de la población. De esta forma los materiales no cargarían con exceso de humedad ni se encontrarían contaminados con otras corrientes de RSU, en algunos casos de características peligrosas.

4.4.- Elementos reciclables y aplicables al campo de la construcción.-

Cada material reciclable necesita ser estudiado minuciosamente para saber si son aplicables en **construcción** y cuál es su tratamiento. A continuación se detalla algunos materiales que pueden ser aplicables y sus características.

4.4.1.- Papel y cartón.-

Estos materiales reciclados pueden tener un gran uso en el ámbito de **acabados**, debido a su gran manejabilidad; y en términos económicos, una gran ventaja hacia el resto de materiales.

En lo que tiene que ver con lo estructural se ha realizado varios estudios y aplicaciones en elementos como vigas o ladrillos, detectando como su mayor **debilidad**: el agua.

VENTAJAS:

- El uso de una tonelada de papel reciclado evita tumbar 17 árboles (valor promedio).
- Para procesar una tonelada de papel reciclado, se necesita solamente el 10 % de la cantidad del agua necesaria para la producción de papel desde la materia prima.
- No se generan emisiones atmosféricas durante el procesamiento de papel reciclado.

4.4.2.- Vidrio.-

Este material puede ser **reutilizado** en construcción para la formación de ventanas, vitrales, acabados. En el caso del armado de muros, se puede utilizar botellas vacías o a medio llenar, para mejorar su **aislamiento térmico** dependiendo el clima del lugar, colocadas en hilera como si fueran ladrillos.

Para su cubrimiento se puede utilizar cemento, adobe, arena, estuco, arcilla, yeso, mortero o cualquier otra masa que mantenga las botellas y el muro estables.

VENTAJAS:

- El vidrio de botellas o recipientes es un producto 100 % reciclable que no sufre de un deterioro de su calidad por el proceso de reciclaje.
- Una botella retornable de vidrio puede ser reutilizada entre 17 y 35 veces antes de ser desechada.

- Permite un gran ahorro de energía, materia prima y se reducen considerablemente las emisiones generadas durante la producción.

4.4.3.- Hierro, acero y aluminio.-

Los productos de hierro son **100 % recuperables** y no pierden su calidad o sus características higiénicas con la fundición.

El producto férreo más común en los desechos domiciliarios son las latas de productos alimenticios que son generalmente estañadas para proteger el producto que contienen. Para poder recuperar el acero, se deben desestañar previamente.

El aluminio se puede reciclar a un 100 % sin disminuir su calidad. Los productos más comunes compuestos de este material y que se encuentran en la basura domiciliaria son:

- Latas de bebida (cerveza, limonada).
- Ollas y sartenes usados.

Además se recicla aluminio grueso, por ejemplo en construcción: como perfiles de ventana, puertas etc., muebles de aluminio, tubería o partes de automóviles, camiones o aviones.

VENTAJAS:

- Se reduce considerablemente la cantidad de materia prima, ya que para la producción de una tonelada de aluminio se necesitan cuatro toneladas de bauxita.
- Se reducen los gastos ambientales y económicos de transporte, energía, agua etc. vinculados al procesamiento de la bauxita.
- La energía para el reciclaje del aluminio es solamente un 5 % de la energía necesaria para producir aluminio de la materia prima (bauxita).

4.4.4.- Maderas y otros.-

Otra de las características de **sustentabilidad** de la madera, es que, finalizada su vida útil, puede convertirse en biomasa, o ser usada para construir aglomerado (compuesto de maderas recicladas).

Si vamos a usar madera en la construcción, procuremos que sea autóctona, para evitar el consumo energético que implica la importación de maderas exóticas, y evitemos el uso de especies en peligro de extinción.

Entre los materiales posibles de reciclar en construcción se encuentra:

- La mampostería en la forma de escombros triturados para hacer contrapisos o pozos romanos.
- Maderas de diversas escuadrías de techos, paneles y pisos.
- Hormigón de pavimentos, que se vuelve a triturar y usar en estructuras de menor compromiso de cargas. Puertas, ventanas y otras aberturas.
- Aislantes termo acústicos.
- Mayólicas y otros revestimientos cerámicos.
- Cañerías metálicas.
- Cubiertas de chapa para cercos de obra.
- Hierro estructural para obras menores.
- Hierro fundido para las líneas de agua y gas.
- Rejas.

4.4.5.- Plástico.-

Según la enciclopedia el plástico es un conjunto de materiales poliméricos orgánicos (los compuestos por moléculas orgánicas gigantes) que son plásticos, es decir, que pueden deformarse hasta conseguir una forma deseada por medio de extrusión, moldeo o hilado.

Las moléculas pueden ser de origen natural, por ejemplo la celulosa, la cera y el caucho (hule) natural, o sintéticas, como el polietileno y el nylon. Los materiales empleados en su fabricación son resinas en forma de bolitas o polvo o en disolución. Con estos materiales se fabrican los plásticos terminados.

Los plásticos se caracterizan por una **relación resistencia/densidad alta**, unas propiedades excelentes para el **aislamiento térmico y eléctrico** y una buena resistencia a los ácidos, álcalis y disolventes.

Existen 3 métodos para el reciclaje de plásticos y su recuperación:

- **Reciclaje Mecánico.-** Es realizado por medio de presión y calor. Es importante la clasificación minuciosa ya que la composición del plástico debe ser homogéneo.
- **Reciclaje Químico.-** Es la descomposición de los plásticos usados clasificados en sus componentes más sencillos. Para ello se utilizan procesos como: la pirólisis, la hidrogenación, la gasificación o el tratamiento con disolventes.

- **Recuperación de Energía.**- Se lo realiza debido a que los plásticos se producen a base de petróleo y tienen un valor calorífico elevado, a veces incluso más elevado que el del carbón o del fuelóleo

DESVENTAJAS:

- Reciclar de forma completa el plástico no es posible, siempre se obtiene un producto de menor calidad que el original.
- Dos productos hechos del mismo plástico pueden tener características diferentes, lo que afecta a la calidad del producto hecho de plástico reciclado.
- Es muy importante clasificar los plásticos no solamente según el tipo de material sino también de acuerdo a su uso anterior y su procedencia.



Figura 7.- Identificación de los diferentes plásticos.



Figura 8.- Reciclaje del PET.

5.- PLÁSTICO COMO MATERIAL.-

El **plástico**, es una sustancia sintética de estructura macro molecular por su gran cantidad de moléculas de hidrocarburos, alcoholes y otros compuestos orgánicos; el plástico es una **sustancia orgánica** por su gran cantidad de carbono en sus moléculas. Puede ser constituido por la acción del calor y la presión ya sea natural o artificialmente, esta última es la forma más apropiada para la fabricación de los productos de plástico.

5.1.- Historia.-

Se origina como resultado de un concurso realizado en 1860, cuando el fabricante estadounidense de bolas de billar Phelan and Collander ofreció una recompensa de 10.000 dólares a quien consiguiera un **sustituto** aceptable del marfil natural, destinado a la fabricación de bolas de billar. Una de las personas que compitieron fue el inventor norteamericano Wesley Hyatt, quien desarrolló un método de procesamiento a presión de la piroxilina, un nitrato de celulosa de baja nitración tratado previamente con alcanfor y una cantidad mínima de disolvente de alcohol.

El **celuloide** se fabricaba disolviendo celulosa, un hidrato de carbono obtenido de las plantas, en una solución de alcanfor y etanol. Con él se empezaron a fabricar distintos objetos como mangos de cuchillo, armazones de lentes y película cinematográfica. Sin éste, no hubiera podido iniciarse la industria cinematográfica a fines del siglo XIX. Puede ser ablandado repetidamente y moldeado de nuevo mediante calor, por lo que recibe el calificativo de termoplástico.

En 1909 el químico norteamericano de origen belga Leo Hendrik Baekeland (1863-1944) **sintetizó un polímero** de interés comercial, a partir de moléculas de fenol y formaldehído. Este producto podía moldearse a medida que se formaba y resultaba duro al solidificar. No conducía la electricidad, era resistente al agua y los disolventes, pero fácilmente mecanizable. Se lo bautizó con el nombre de **baquelita** (o bakelita), el primer plástico totalmente sintético de la historia.

Entre los productos desarrollados durante este periodo están los polímeros naturales alterados, como el rayón, fabricado a partir de productos de celulosa.

En 1833 Berzelius introdujo la palabra polímero, que él usaba para indicar la presencia de los mismos átomos en las mismas proporciones en compuestos, pero que tenían distintos **peso moleculares**.

5.2.- Evolución.-

Los resultados alcanzados por los primeros plásticos incentivaron a los químicos y a la industria a buscar otras moléculas sencillas que pudieran enlazarse para crear polímeros. En la década del 30, químicos ingleses descubrieron que el gas etileno polimerizaba bajo la acción del calor y la presión, formando un termoplástico al que llamaron **polietileno (PE)**. Hacia los años 50 aparece el **polipropileno (PP)**.

Al reemplazar en el etileno un átomo de hidrógeno por uno de cloruro se produjo el **cloruro de polivinilo (PVC)**, un plástico duro y resistente al fuego, especialmente adecuado para cañerías de todo tipo. Al agregarles diversos aditivos se logra un material más blando, sustitutivo del caucho, comúnmente usado para ropa impermeable, manteles, cortinas y juguetes. Un plástico parecido al PVC es el politetrafluoretileno (PTFE), conocido popularmente como **teflón** y usado para rodillos y sartenes antiadherentes.

Otro de los plásticos desarrollados en los años 30 en Alemania fue el **poliestireno (PS)**, un material muy transparente comúnmente utilizado para vasos, potes y hueveras. El **poliestireno expandido (EPS)**, una espuma blanca y rígida, es usado básicamente para embalaje y aislante térmico.

También en los años 30 se crea la primera fibra artificial, el **nylon**. Su descubridor fue el químico Wallace Carothers, que trabajaba para la empresa Dupont. Descubrió que dos sustancias químicas como el hexametildiamina y ácido adípico, formaban polímeros que bombeados a través de agujeros y estirados formaban hilos que podían tejerse. Su primer uso fue la fabricación de paracaídas para las fuerzas armadas estadounidenses durante la Segunda Guerra Mundial, extendiéndose rápidamente a la industria textil en la fabricación de medias y otros tejidos combinados con algodón o lana. Al nylon le siguieron otras fibras sintéticas como por ejemplo el orlón y el acrilán.

En la presente década, principalmente en lo que tiene que ver con el envasado en botellas y frascos, se ha desarrollado vertiginosamente el uso del **tereftalato de polietileno (PET)**, material que viene desplazando al vidrio y al PVC en el mercado de **envases**.

El nylon se convirtió en una de las fuentes principales de fibras textiles, los poliésteres se utilizaron en la fabricación de blindajes y otros materiales bélicos, y se produjeron en grandes cantidades varios tipos de caucho sintético.



5.3.- Características Generales de los Plásticos.-

Los plásticos se caracterizan por una relación resistencia densidad alta, unas propiedades excelentes para el aislamiento térmico y eléctrico y una buena resistencia a los ácidos, álcalis y disolventes. Las enormes moléculas de las que están compuestos pueden ser lineales, ramificadas o entrecruzadas, dependiendo del tipo de plástico. Las moléculas lineales y ramificadas son **termoplásticas** (se ablandan con el calor), mientras que las entrecruzadas son **termoestables** (se mantienen las propiedades con el calor).

5.3.1.- Polímeros.-

La materia está formada por moléculas que pueden ser de tamaño normal o moléculas gigantes llamadas polímeros. Se producen por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas **monómeros** que forman enormes cadenas de las formas más diferentes. Algunas parecen fideos, otras tienen ramificaciones, otras, globos, etc. Algunas se asemejan a las escaleras de mano y otras son como redes tridimensionales.

Si el número de unidades es muy grande, se usa también la expresión gran polímero. Un **polímero** no tiene la necesidad de constar de moléculas individuales todas del mismo peso molecular, y no es necesario que tengan todas las mismas composiciones químicas y la misma estructura molecular. Hay polímeros naturales como ciertas proteínas globulares y polímeros naturales, cuyas moléculas individuales tienen todas el mismo peso molecular y la misma estructura molecular; pero la gran mayoría de los polímeros sintéticos y naturales importantes son mezclas de componentes **poliméricos homólogos**. La pequeña variabilidad en la composición química y en la estructura molecular es el resultado de la presencia de grupos finales, ramas ocasionales, variaciones en la orientación de unidades monómeras y la irregularidad en el orden en el que se suceden los diferentes tipos de esas unidades en los **copolímeros**. Estas variedades en general no suelen afectar a las propiedades del producto final, sin embargo, se ha descubierto que en ciertos casos hubo variaciones en copolímeros y ciertos polímeros cristalinos.

La mayor parte de los polímeros que usamos en nuestra vida diaria son **materiales sintéticos** con propiedades y aplicaciones variadas. Lo que distingue a los polímeros de los materiales constituidos por moléculas de tamaño normal son sus propiedades mecánicas. En general, los polímeros tienen una muy buena **resistencia mecánica** debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases.

5.3.2.- Técnicas de Moldeo de los Plásticos.-

Consiste en dar las formas y medidas deseadas a un plástico por medio de un molde. El molde es una pieza hueca en la que se vierte el plástico fundido para que adquiera su forma. Para ello los plásticos se introducen a presión en los moldes. En función del tipo de presión, tenemos estos dos tipos:

- **Moldeo a Alta Presión.-**

Para el moldeo a presión se utilizan máquinas hidráulicas que ejercen la presión suficiente para el moldeo de las piezas. Existen tres tipos: compresión, inyección y extrusión:

- **Compresión:** en este proceso, el plástico en polvo es calentado y comprimido entre las dos partes de un molde mediante la acción de una prensa hidráulica, ya que la presión requerida en este proceso es muy grande. Este proceso se usa para obtener pequeñas piezas de baquelita, como los mangos aislantes del calor de los recipientes y utensilios de cocina.
- **Inyección:** consiste en introducir el plástico granulado dentro de un cilindro, donde se calienta. En el interior del cilindro hay un tornillo sinfín que actúa de igual manera que el émbolo de una jeringuilla. Cuando el plástico se reblandece lo suficiente, el tornillo sinfín lo inyecta a alta presión en el interior de un molde de acero para darle forma.

El molde y el plástico inyectado se enfrían mediante unos canales interiores por los que circula agua. Por su economía y rapidez, el moldeo por inyección resulta muy indicado para la producción de grandes series de piezas. Por este procedimiento se fabrican palanganas, cubos, carcasas, componentes del automóvil, etc.

- **Extrusión:** consiste en moldear productos de manera continua, ya que el material es empujado por un tornillo sinfín a través de un cilindro que acaba en una boquilla, lo que produce una tira de longitud indefinida. Cambiando la forma de la boquilla se pueden obtener barras de distintos perfiles. También se emplea este procedimiento para la fabricación de tuberías, inyectando aire a presión a través de un orificio en la punta del cabezal. Regulando la presión del aire se pueden conseguir tubos de distintos espesores.

- **Moldeo a Baja Presión.-**

Se emplea para dar forma a láminas de plástico mediante la aplicación de calor y presión hasta adaptarlas a un molde. Se utilizan dos procedimientos:

- El primero consiste en efectuar el **vacío** absorbiendo el aire que hay entre la lámina y el molde, de manera que ésta se adapte a la forma del molde. Este tipo de moldeo se emplea para la obtención de envases de productos alimenticios en moldes que reproducen la forma de los objetos que han de contener.

- El segundo procedimiento consiste en aplicar **aire a presión** contra la lámina de plástico hasta adaptarla al molde. Este procedimiento se denomina moldeo por soplado, como el caso de la extrusión, aunque se trata de dos técnicas totalmente diferentes. Se emplea para la fabricación de cúpulas, piezas huecas, etc.

5.3.3.- Colada.-

La colada consiste en el vertido del material plástico en estado líquido dentro de un molde, donde fragua y se solidifica. La colada es útil para fabricar pocas piezas o cuando emplean moldes de materiales baratos de poca duración, como escayola o madera. Debido a su lentitud, este procedimiento no resulta útil para la fabricación de grandes series de piezas.

5.3.4.- Espumado.-

Consiste en introducir aire u otro gas en el interior de la masa de plástico de manera que se formen burbujas permanentes. Por este procedimiento se obtiene la espuma de poliestireno, la espuma de poliuretano (PUR), etc. Con estos materiales se fabrican colchones, aislantes termoacústicos, esponjas, embalajes, cascos de ciclismo y patinaje, plafones ligeros y otros.

5.3.5.- Calandrado.-

Consiste en hacer pasar el material plástico a través de unos rodillos que producen, mediante presión, láminas de plástico flexibles de diferente espesor. Estas láminas se utilizan para fabricar hules, impermeables o planchas de plástico de poco grosor.

5.4.- El PET como material.-

El PET reciclado procede fundamentalmente de **botellas y envases**. La valorización de este producto se ha llevado a cabo mediante la puesta a punto de un proceso de fabricación sencillo y económicamente rentable, basado en técnicas convencionales de compounding, que permita la obtención de **compuestos plásticos** de ingeniería aptos para aplicaciones exigentes, como pueden ser las piezas de automoción, en las cuales las propiedades mecánicas, la resistencia a la temperatura y la estabilidad dimensional son esenciales.

Las **resinas** de ingeniería basadas en polietileno tereftalato (PET) se producen a partir de un polímero de viscosidad media que es químicamente equivalente a los usados en fibras, películas y envases. Estas resinas ordinariamente reforzadas, pueden ser moldeadas para producir piezas estructurales con alta resistencia al impacto en electrodomésticos y automoción. También tienen múltiples aplicaciones en otros sectores como construcción, mueble, eléctrico y electrónico, etc.

El PET puede ser considerado una **materia prima** de bajo coste para la producción de compuestos de ingeniería cuando se compara con otro tipo de polímeros. La razón es que es un **recurso fácilmente disponible** gracias al reciclado de botellas de agua mineral, y que en el futuro lo será aún más debido al desarrollo y proliferación del reciclado de plásticos en todo el mundo.

Sin embargo, este polímero presenta una serie de **desventajas** comparado con otros termoplásticos de ingeniería cuando la técnica de transformación empleada es el moldeo por inyección. El PET posee una velocidad de cristalización baja, lo que le confiere cierta tendencia a fragilizarse, característica que ha mantenido alejada a esta resina del proceso de inyección. Otros inconvenientes que presenta son su alta sensibilidad a la humedad y baja temperatura de transición vítrea. Sin embargo, tiene **ventajas** como un alto módulo mecánico, alta resistencia a la temperatura y brillo superficial, siempre y cuando presente una cristalización adecuada.

Una de las mayores limitaciones del PET es su **baja velocidad de cristalización**. Al igual que otros polímeros con esta característica, el polibuteno por ejemplo, el PET precisa de largos tiempos de ciclo para conseguir la suficiente cristalinidad. Este hecho lo hace poco adecuado para su uso en **inyección**. Además, en el caso del PET la estructura cristalina generada presenta un tamaño de cristal grande, que suele provocar cierta fragilidad mecánica en el moldeo. El PET amorfo se ablanda a una temperatura de sólo 80 °C. La cristalinidad proporciona mejora en la resistencia térmica y mecánica, necesaria para la mayoría de los usos que puede tener un polímero ingenieril.

Las sales alcalinas de ácidos carboxílicos de alto peso molecular son muy efectivas como **nucleantes** de PET. Estas sales pueden ser distribuidas muy homogéneamente y en bajas concentraciones por todo el polímero, lo cual las hace más efectivas.

Los poliéster también actúan como nucleantes y promotores de cristalización. Son **plastificantes líquidos** que reducen las fuerzas intermoleculares entre las cadenas de polímero, y que permiten un mayor deslizamiento entre éstas, pudiendo entonces ordenarse de la forma más favorable para la formación del cristal.

5.4.1.- Propiedades como producto.-

- Cristalinidad y transparencia, aunque admite cargas de colorantes.
- Buen comportamiento frente a esfuerzos permanentes.
- Alta resistencia al desgaste.
- Muy buena barrera a CO₂, aceptable barrera a O₂ y humedad.
- Compatible con otros materiales barrera que mejoran en su conjunto la calidad barrera de los envases y por lo tanto permiten su uso en mercados específicos.
- Propiedades ignífugas en los tipos con aditivos.
- Excelentes propiedades mecánicas.
- Barrera de los gases.
- Cristalizable.
- Reciclable.
- Liviano

5.4.2.- Otras propiedades.-

- Baja absorción de humedad que lo hacen muy adecuado para la fabricación de fibras.
- Alta rigidez y dureza.
- Gran indeformabilidad al calor.
- Muy buenas características eléctricas y dieléctricas.
- Alta resistencia a los agentes químicos y estabilidad a la intemperie.

5.4.3.- Características del PET.-

- Biorientación.
Permite lograr propiedades mecánicas y de barrera con optimización de espesores.
- Cristalización
Permite lograr resistencia térmica para utilizar bandejas termoformadas en hornos a elevadas temperaturas de cocción, permite cocción en microondas
- Esterilizable
Por gamma y óxido de etileno.



- Alternativas ecológicas
 - Retornabilidad
 - Fibras
 - Poliols para poliuretanos
 - Incineración

5.4.4.- Resistencia química del PET.-

Buena resistencia general en especial a:

- Grasas y aceites presentes en alimentos
- Soluciones diluidas de ácidos minerales
- Álcalis, sales, jabones, hidrocarburos alifáticos y alcoholes.

Poca resistencia a:

- Solventes halogenados
- Aromáticos
- Cetonas de bajo peso molecular

6.- VIDRIO COMO MATERIAL.

El vidrio es uno de los materiales más **cotidianos** y con el que estamos continuamente en contacto. Se fabrica con un recurso natural que procede de minas de arena (se obtiene básicamente a partir de sílice, caliza y sosa). Es una sustancia dura, frágil, translúcida, refringente (produce refracción de la luz) y mala conductora del calor la electricidad.

A lo largo de su historia, el vidrio ha demostrado ser uno de los materiales de **envase** más **respetuosos** con el medio ambiente. Es 100% reciclable y en un número indeterminado de veces. Las materias primas de las que se fabrica el vidrio son abundantes en la naturaleza, y éstas se obtienen mediante un proceso de extracción sencillo y poco contaminante. No obstante, la extracción de **arena** debe ser bien manejada porque de lo contrario puede generar contaminación y erosión.

El vidrio posee **características** que hacen que no interfiera con las propiedades de los productos que contiene. Por otra parte, su degradación química y su erosión física son muy lentas, pero no libera sustancia alguna que pueda resultar perjudicial para el entorno. Además, para su fusión, se puede emplear cualquier tipo de energía.

6.1.- Composición del vidrio.-

Desde el punto de vista físico, el vidrio es una **sustancia líquida** sobreenfriada y solidificada. De manera persistente, el hombre se ha valido de dicho material para tratar de imitar las diversas vitrificaciones que presenta la naturaleza, tales como el cuarzo, la cornalina, el ágata, el jaspe, la obsidiana y el cristal de roca, que es una variedad de cuarzo cristalino, incoloro, de gran pureza y totalmente transparente.

Esta búsqueda constante lo llevó primero a reproducir con vidrio piedras semipreciosas, como la turquesa o la malaquita, a fin de incrustarlas en joyería. Progresivamente, los artesanos vidrieros perfeccionaron sus técnicas hasta conseguir, con fabulosas recetas de alquimia, el vidrio incoloro e incluso el cristal de plomo, que logra simular, casi a la perfección, la transparencia y belleza del cristal de roca.

El vidrio es una sustancia dura, no cristalina, frágil, de aspecto translúcido y en la mayoría de los casos transparente. Surge de la **fusión** a alta temperatura de una mezcla de sílice o arena sílica con un álcali terroso o carbonato de calcio y con un carbonato de sodio, sosa o potasa, dentro de un reactor de fusión.

Se deben de reunir 2,5 partes o más de sílice por una de fundente. Un exceso de bases haría que el vidrio fuese demasiado fluido y por tanto impropio para el trabajo, al tiempo en que un exceso de sílice conduciría a la desvitrificación. Como resultado de la presencia de uno de los dos carbonatos, el vidrio varía en su aspecto, según la época y la zona geográfica en que fue elaborado.

El punto en que la mezcla vítrea pasa de estado sólido al **líquido viscoso**, varía entre los 1.300 y los 1.500 grados centígrados. Una vez realizada la mezcla, alcanza de forma gradual la consistencia sólida, mediante un proceso de lento enfriamiento hasta adoptar su aspecto característico de material sólido transparente.

El vidrio se modela en **caliente**, en el poco tiempo en que se conserva entre el rojo amarillo y el rojo naranja. El proceso de recocido debe ser extremadamente lento, para impedir con ello la cristalización de los silicatos presentes en la mezcla. De no ser así, se puede originar una disminución sensible en la transparencia del vidrio, volviéndolo opaco y expuesto a romperse por impacto térmico. La curva de enfriamiento depende del espesor y del tamaño de la pieza.

6.2.- Características mecánicas.-

Durante su uso el vidrio puede estar sometido a **esfuerzos mecánicos** de diferente tipo: tracción, compresión, torsión, impacto y penetración. El comportamiento del vidrio bajo estos esfuerzos depende de varios factores, entre los que se encuentran la rigidez de los enlaces entre las moléculas que lo constituyen y, principalmente, el estado de su superficie.

En la superficie del vidrio existen **fisuras microscópicas** que actúan como lugares de concentración de las tensiones mecánicas y en consecuencia como centros de iniciación de posibles fracturas, debido a la imposibilidad de eliminar estos defectos microscópicos la resistencia mecánica real del vidrio está muy por debajo de su resistencia teórica, otra de las consecuencias de estas microfisuras superficiales es que la resistencia a la compresión de un vidrio es mucho más elevada que la resistencia a la tracción, por lo que un vidrio rompe siempre a tracción.

No es posible dar un valor preciso de la resistencia a **tracción** ya que el valor característico de esta resistencia mecánica está asociada con el estado de la superficie y le influye de manera notable la duración de la aplicación de la carga.

Los ensayos proporcionan los siguientes resultados:

- Resistencia a la compresión.

La resistencia del vidrio a la compresión es muy elevada (10.000 kg/cm^2) por lo que, en sus aplicaciones normales, es prácticamente imposible la rotura del vidrio por compresión.

- Resistencia a la tracción.

La resistencia a la tracción es, para el vidrio recocido, del orden de 400 kg/cm^2 ; para el vidrio templado DUGLASS es del orden de 1000 kg/cm^2 (dos veces y media superior).

- Resistencia a la flexión.

Cuando un vidrio está trabajando a flexión tiene una cara sometida a tracción y la otra a compresión. La resistencia a la rotura por flexión será pues:

- Para un vidrio recocido, sin defectos visibles, del orden de 400 Kg/cm^2
- Para un vidrio templado, del orden de 1000 kg/cm^2

- Densidad.

La densidad del vidrio es de 2.5 gr/cm^3 , lo que supone, para un vidrio plano, una masa de 2.5 Kg por m^2 y milímetro de espesor.

- Dureza.

La dureza del vidrio (su resistencia al rayado) es de 6.5 en la escala de MOHS, lo que representa una dureza ligeramente inferior a la del cuarzo.

- Elasticidad.

Módulo de Young "E", es el coeficiente que relaciona el alargamiento que experimenta una barra de vidrio de longitud l y sección S sometida a una fuerza de tracción F

Para el vidrio común $E = 7.100 \text{ kg/mm}^2$

- Coeficiente de Poisson.

Es la relación entre la deformación lateral (contracción) y la longitud (alargamiento) cuando se aplica al vidrio un esfuerzo de tracción. En el vidrio común es de 0,22. (Excepto al Borosilicato)

6.3.- Características térmicas.-

Las propiedades térmicas del vidrio se pueden describir por tres constantes intrínsecas al material:

- Calor específico.

Es la cantidad de calor necesaria para elevar 1°C la temperatura de 1 kg de material. Como el calor específico varía con la temperatura del material, se suele dar su valor a 20 ° C.

- Conductividad térmica.

Cantidad de calor que atraviesa, por m² y hora, una pared de caras paralelas y de un metro de espesor cuando entre sus caras se establece una diferencia de temperaturas de 1°C.

- Coeficiente de dilatación lineal.

Es el alargamiento por unidad de longitud que experimenta un material cuando aumenta 1°C su temperatura.

- Conducción.

El calor se transmite por conducción a través de un medio material (sólido, líquido o gas). Las moléculas calientes comunican parte de su energía de vibración a sus vecinas más frías continuando dicho proceso a lo largo de todo el material.

- Convección.

Esta forma de transmisión de calor es propia de líquidos y gases. La diferencia de temperatura provoca diferencias de densidad que a su vez dan lugar a movimientos en el fluido; el más caliente sube y es reemplazado por otro más frío. Si además el fluido posee algún otro tipo de movimiento se dice que hay convección forzada.

- Radiación.

Todo cuerpo emite energía electromagnética de manera continua, la cantidad de energía y el espectro de emisión dependen de la temperatura del cuerpo y de sus propiedades emisivas. Este mecanismo no precisa de contacto material por lo que tiene lugar incluso en el vacío.

Con el objeto de describir el comportamiento térmico de un acristalamiento se define el coeficiente de transmisión térmica "K" que tiene en cuenta los tres mecanismos de transmisión de calor, un valor de K pequeño nos indica un buen aislamiento térmico, K depende en gran medida de la existencia de cámara de aire y de su espesor, así como del tratamiento superficial de los vidrios, si se utiliza un vidrio con tratamiento bajo emisivo las pérdidas por radiación son mucho menores.

6.4.- Características químicas.-

- Resistencia al agua.

Sin estabilizante como óxido o carbonato de calcio, el agua ataca al vidrio disolviendo algunos de sus componentes lo que se manifiesta por pequeñas pérdidas de masa. La intensidad del ataque depende de varios factores: la temperatura, el tiempo de contacto, la composición del vidrio, la agitación y el estado de la superficie. A temperatura ambiente el ataque es insignificante, la pérdida de masa después de estar sumergido durante horas es prácticamente inapreciable. Al aumentar la temperatura, la intensidad del ataque crece exponencialmente.

- Resistencia a los agentes atmosféricos.

El ataque del vidrio por agentes atmosféricos puede ocasionar la aparición en su superficie de manchas y descamaciones cuando son escaso en estabilizantes. El principal responsable de dicho ataque es el agua contenida en la atmósfera que se condensa frecuentemente sobre la superficie fría del vidrio. Esta pequeña cantidad de agua superficial es más peligrosa que gran cantidad de agua fluyendo ya que da lugar a una disolución concentrada de Na (OH) que ataca al vidrio. Resulta por consiguiente aconsejable evitar en lo posible la condensación. El resto de los gases atmosféricos no atacan al vidrio.

7.- MATERIALES COMPUESTOS.-

Un material compuesto está formado por dos o más **componentes** y se caracteriza porque las propiedades del material final son superiores a las que tienen los materiales constituyentes por separado.

Los materiales compuestos están formados por **dos fases**; una continua denominada **matriz** y otra dispersa denominada **refuerzo** o **carga**. El refuerzo proporciona las propiedades mecánicas al material compuesto y la matriz la resistencia térmica y ambiental. Matriz y refuerzo se encuentran separadas por la interfase.

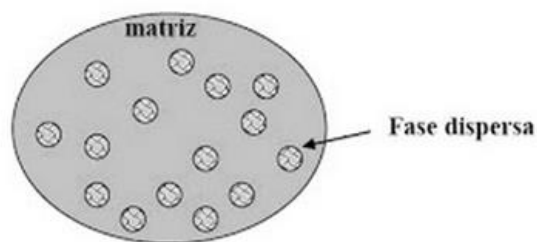


Figura 9.- Esquema material compuesto.

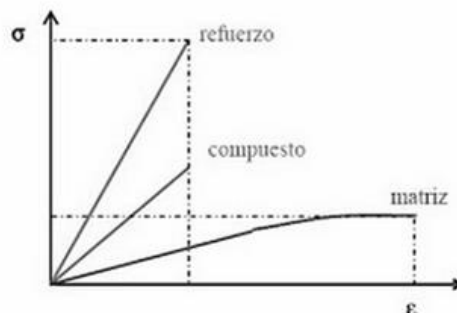


Figura 10.- Propiedades mecánicas de la matriz, el refuerzo y el material compuesto.

Las propiedades de los materiales compuestos dependen de una serie de factores:

- propiedades de la matriz y del refuerzo.
- contenido de refuerzo.
- orientación del refuerzo.
- método de producción del material compuesto.

7.1.- Clasificación de los materiales compuestos.-

7.1.1.- Clasificación según la forma de los constituyentes.-

Composites fibrosos: el refuerzo es una fibra, es decir, un material con una relación longitud/diámetro muy alta. Las fibras pueden ser continuas o discontinuas (estas últimas pueden ser aleatorias o unidireccionales). Ejemplo: *epoxi con fibra de vidrio*.

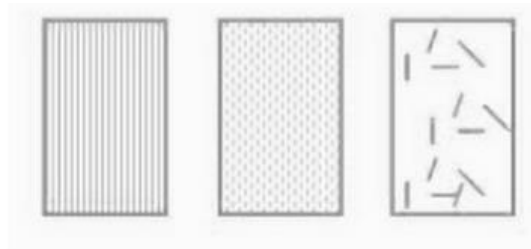


Figura 11.- Tipos de disposición de fibras.

Composites particulados: el refuerzo son partículas equiaxiales, es decir, las dimensiones de las partículas son aproximadamente iguales en todas las direcciones. Ejemplo: *caucho reforzado con negro de humo*.

Composites estructurales: son materiales constituidos por la combinación de materiales compuestos y materiales homogéneos. Se clasifican a su vez en materiales laminados (constituidos por apilamiento de láminas paralelas) o paneles sándwich (compuestos de núcleo y tapas)

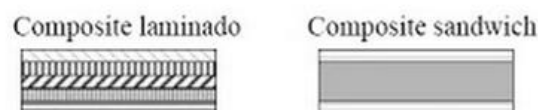


Figura 12.- Tipos de materiales compuestos estructurales.

7.1.2.- Clasificación según la naturaleza de los constituyentes.-

Composites de matriz orgánica (polímeros):

- presentan baja densidad
- posibilidad de obtención de piezas complicadas
- son los más utilizados en la actualidad

Entre sus desventajas se incluye la poca resistencia frente al fuego.

Composites de matriz metálica (aleaciones de aluminio, titanio y magnesio):

- mayor duración
- elevada conductividad térmica y eléctrica
- no absorben humedad
- mayor resistencia al desgaste

Su principal desventaja es su alto precio

Composites de matriz mineral (cerámica): alúmina, CSi (carburo de silicio), etc.:

- Destacan porque resisten temperaturas elevadas y su principal desventaja su fragilidad y baja resistencia a choques térmicos.

7.1.3.- Clasificación según el tamaño de la fase dispersa.-

Microcomposites o composites convencionales:

El tamaño del refuerzo es del orden de la micra (10^{-6} m). A pesar de las mejores propiedades mecánicas de estos composites, también presentan problemas:

- dificultad de procesado
- no se pueden procesar para obtener láminas o fibras

Estos problemas son consecuencia de la diferencia de tamaño entre el refuerzo y los componentes de la matriz (cadenas de polímero en el caso de los composites de matriz orgánica). Esta diferencia da lugar a interacciones débiles entre la matriz y la interfase.

Para evitar este problema y mejorar las interacciones se ha desarrollado un nuevo tipo de composite:

Nanocomposites: el tamaño del refuerzo es del orden del nanómetro (10^{-9} m= 10^{-3} micras). En este caso, las interacciones matriz-refuerzo se dan a nivel molecular.

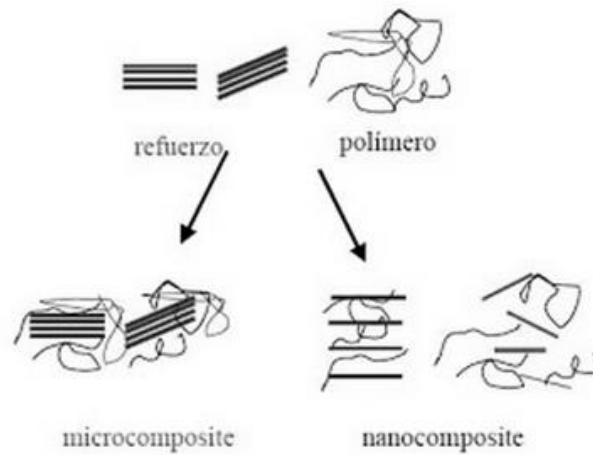


Figura 13.- Clasificación por tamaño de la fase dispersa.

7.2.- Materiales compuestos de matriz orgánica: Constituyentes.-

7.2.1.- Matrices. Generalidades.-

La matriz cumple varias funciones en el material compuesto:

- Su función principal es soportar la carga aplicada y transmitirla al refuerzo a través de la interfase. Para ello la matriz debe ser deformable
- Proteger las fibras del medio externo y mantenerlas unidas. Esta función requiere una buena compatibilidad entre matriz y refuerzo.

Las matrices poliméricas pueden ser **termoestables o termoplásticas** en función de si presentan o no reticulaciones:

a.- Las **matrices termoestables** presentan uniones covalentes formadas en la reacción de reticulación o curado. Estas matrices presentan las siguientes características:

- Son fáciles de procesar antes del curado debido al bajo peso molecular de las resinas precursoras o prepolímeros.
- Debido a la formación de reticulación son más tenaces.
- Son más frágiles que las termoplásticas.

b.- Las matrices termoplásticas no tienen uniones permanentes entre cadenas porque no reticulan. Estas matrices presentan las siguientes características:

- Son más difíciles de procesar ya que deben tener un alto peso molecular para presentar buenas propiedades mecánicas.
- Se pueden reciclar ya que se reblandecen al calentar y vuelven a la forma sólida al enfriarlos.

7.2.2.- Matrices termoestables.-

Las resinas termoestables son aquellas que sufren una serie de reacciones químicas, llamadas de curado o reticulación, dando lugar a un **producto rígido, insoluble e infusible**. La obtención de matrices termoestables se da en dos etapas:

- a) En la planta química se polimeriza parcialmente el monómero formando cadenas lineales.
- b) En la planta de producción donde se completa la reticulación bajo calor y presión.

Resinas de poliéster insaturado

Son las más utilizadas en la fabricación de composites de uso general. La obtención de estas resinas insaturadas se lleva a cabo en dos pasos:

1) Policondensación: se produce por la reacción de un diol y dos ácidos dicarboxílicos. Uno de los ácidos debe presentar insaturaciones y si el otro es saturado la resina tendrá mayor flexibilidad.

2) Reticulación con estireno. La resina preparada en la etapa anterior se impregna con estireno que se adiciona a los dobles enlaces teniendo lugar la reticulación.

La **reticulación** se lleva a cabo con un iniciador (generalmente peróxidos) y un acelerador (sales de cobalto). Los iniciadores son moléculas que se descomponen por la acción del calor o de la luz dando especies muy reactivas denominadas radicales. Estos radicales reaccionan con una molécula de poliéster o estireno dando lugar a nuevos radicales produciéndose una reacción en cadena.

Estas matrices presentan las siguientes ventajas:

- Son fáciles de procesar ya que se pueden reticular incluso a temperatura ambiente)
- Poseen buena resistencia química
- Tienen bajo precio

Entre sus desventajas destacan:

- Su contracción en el curado es elevada
- La reacción de curado es altamente exotérmica y esto puede generar daños en el material.
- En la reticulación se producen elevadas emisiones de estireno
- Las propiedades mecánicas son medias

Resinas vinil-éster

La obtención de estas resinas insaturadas se lleva a cabo también en dos pasos:

1) Policondensación:

Se produce por la reacción de una resina epoxi y ácidos acrílicos o metacrílicos, que proporcionan la instauración.

2) Reticulación con estireno.

La resina obtenida en la etapa anterior se hace reaccionar con estireno que se adiciona a los dobles enlaces teniendo lugar la reticulación.

Estas matrices presentan las siguientes ventajas:

- Se caracterizan por su buena resistencia química y a la corrosión
- Presentan una buena capacidad de adhesión

Entre sus desventajas destacan:

- Su precio es más elevado que el de las resinas de poliéster



Resinas fenólicas

La reticulación se produce por condensación entre un grupo fenólico y formaldehído, generándose agua como producto residual. El agua debe eliminarse ya que puede dar lugar a defectos en la pieza final por formación de grietas o poros.

Existen dos grandes grupos de resinas fenólicas:

a) Novolacas:

La relación molar entre fenol y formaldehído es mayor que uno, y se trabaja en medio ácido.

b) Resoles:

La relación molar entre fenol y formaldehído es menor que uno, y se trabaja en medio básico.

Estas matrices presentan las siguientes ventajas:

- Dan lugar al retardo de la llama y a una baja emisión de humo y gases tóxicos.

Entre sus desventajas destacan:

- Se forma agua durante el curado que hay que eliminar para evitar defectos en las piezas
- Las propiedades mecánicas son bajas

Resinas epoxi

Prepolímeros con grupo epoxi reticulan con iniciadores polifuncionales como aminas, fenoles o poliácidos.

Estas matrices presentan las siguientes ventajas:

- Las propiedades mecánicas son excelentes
- El grado de contracción durante el curado es bajo
- Su resistencia térmica es elevada



Entre sus desventajas destacan:

- Su elevado precio
- El curado de la resina es lento

7.2.3.- Matrices termoplásticas.-

Están constituidas por moléculas lineales unidas por **enlaces sencillos**. Tienen una temperatura por encima de la cuál empiezan a fluir y al enfriarlos por debajo de esa temperatura vuelven a su estado sólido.

El procesado de los termoplásticos consta de una fase de calentamiento para ablandar el material y realizar el **moldeo** y una fase de enfriamiento posterior para endurecerlo una vez moldeado en su forma apropiada.

Las matrices termoplásticas se caracterizan por presentar las siguientes propiedades mecánicas:

Ventajas:

- Buena resistencia química
- Baja absorción de humedad
- Buenas propiedades mecánicas
- Velocidad de producción elevada debido a la menor duración del ciclo de moldeo
- Las piezas se pueden reparar fácilmente al reblandecer las piezas por efecto del calor y unir las partes
- Se pueden reciclar
- Admiten el almacenamiento ilimitado frente a las termoestables que deben almacenarse en condiciones controladas de temperatura y humedad.

Entre los inconvenientes de las matrices termoplásticas destacan:

- Tendencia a la fluencia a temperaturas elevadas
- Para tener buenas propiedades mecánicas el peso molecular debe ser elevado y por lo tanto, la viscosidad también. Esto da lugar a que la impregnación de las fibras sea difícil.
- Requieren temperaturas y presiones elevadas para su moldeo

A pesar de sus desventajas, en la actualidad las matrices termoplásticas están sustituyendo a las termoestables debido sobre todo a su **reciclabilidad**.

Polipropileno (PP).-

- Es el termoplástico más utilizado como matriz, sobre todo el isotáctico
- Su densidad es la menor entre los termoplásticos
- El PP reforzado presenta además de la reciclabilidad: buenas propiedades mecánicas y térmicas

Polietileno tereftalato (PET).-

Presenta las siguientes características:

- Gran transparencia
- Resistencia a la fluencia
- Buena resistencia al fuego
- Buenas características eléctricas

Policarbonato.-

Se caracteriza por su gran transparencia, buena estabilidad dimensional y resistencia frente al fuego. Su principal desventaja es la poca resistencia a los disolventes

Características:

- Gran transparencia (amorfo)
- Buena estabilidad dimensional
- Buena resistencia al fuego

DESARROLLO TRABAJO INGENIERIL.-

8.- INTRODUCCIÓN.-

En el presente Proyecto Integrador se analiza el comportamiento físico y mecánico que presenta un nuevo **material compuesto** formado por una matriz polimérica de **PET** reciclado y reforzado con partículas de **VIDRIO** reciclado también. Para este análisis se obtiene polvo en una **composición** de 40% en peso de partículas de VIDRIO, con el fin de fabricar por una tecnología “similar” a la **tecnología de polvos**, las probetas necesarias para obtener los resultados que permitan determinar el comportamiento físico y mecánico de estos materiales bajo los ensayos elegidos.

La utilización de VIDRIO como carga en una matriz polimérica como es el PET, da la posibilidad de desarrollar un gran número de materiales compuestos diferentes, variando sus parámetros como son la **granulometría** y el **porcentaje en peso**. Para el caso en estudio se eligió un solo tamaño del grano y un porcentaje, basado en resultados de otros trabajos de investigación, ya que el fin de este estudio es ver cómo afecta el VIDRIO en el comportamiento del PET mediante comparación.

8.1.- Hipótesis.-

Considerando los múltiples **usos** que se le puede dar al PET, se han desarrollado metodologías de procesamiento para conformar materiales compuestos a base de una matriz polimérica reforzada, obtenidos principalmente por procesos que combinan el **moldeo** por inyección termoplástica y la metalurgia convencional de **polvos**. Aunque no se encontró evidencia del uso de una técnica de polvos (que incluya el mezclado de los componentes en polvo, para ser conformados isotérmicamente y pasar a un proceso final de prensado en caliente), aplicada a materiales compuestos, como la que se emplea en este estudio.

El motivo por el cual se elige este proceso de fabricación, es el de poder realizarlo en las instalaciones del laboratorio de materiales de la Facultad, utilizando los **recursos disponibles**. Por eso se optó por un proceso sencillo y con bajo nivel de maquinaria.

8.2.- Metodología.-

8.2.1.- Selección de los materiales.-

La elección de los materiales a utilizar se basa principalmente en el **reciclaje** de residuos sólidos y el impacto que tiene este sobre el ambiente como en la sociedad. Como se ha mostrado en el marco teórico, el plástico abarca casi un 15% y el vidrio un 5% del total de los residuos, pero a su vez, tomando los desechos no orgánicos, que representan el 50% de los totales, la suma del plástico y del vidrio da un **40% de los residuos sólidos no orgánicos**. Por ese motivo que se decidió trabajar con el PET como material principal y el VIDRIO como refuerzo.

Si bien hay muchos trabajos y proyectos desarrollados sobre la reutilización del PET como material para la construcción, entre otros propósitos, la idea de agregarle VIDRIO consiste en **disminuir el volumen** de plástico que se utiliza para conseguir un material que sea aplicable a tal fin.

Los plásticos son materiales aptos para ser **reutilizados** por su versatilidad, su durabilidad, su resistencia a diferentes agentes externos y químicos, su efectividad como aislante de frío, calor y ruido, su bajo costo frente a otros materiales constructivos, de fácil limpieza y mantenimiento, sencilla manipulación y rápida instalación, por ser livianos y con una gran vida útil. Por eso es que cada vez son más incluidos en la construcción.

El vidrio es uno de los materiales **más cotidianos** y con el que estamos continuamente en contacto, ya que se presenta en todo tipo de envases por ser impermeable, químicamente inerte y una barrera contra los cambios de temperatura. Es 100% reciclable y en un número indeterminado de veces. Su utilización en la construcción se remonta al siglo XVI, por lo cual es un material de uso cotidiano.

Un concepto fundamental a la hora de plantearse el empleo de VIDRIO como refuerzo de un material polimérico es la **compatibilidad** existente entre estos dos materiales. Para este caso no se encontró incompatibilidad alguna, ya que se tratan de materiales estables a la intemperie e inertes entre sí.

8.2.1.1.- Selección de los parámetros.

Los parámetros que se pueden variar en un material compuesto son: el **porcentaje en peso** de la carga, y su **granulometría**. Como se mencionó anteriormente, en este trabajo se eligió un valor de porcentaje en peso y una granulometría con el fin de formar un **único material** en estudio.

El **porcentaje en peso** que se eligió es del **40%**. Se conocen materiales de hasta 80% en peso de carga, pero el motivo por el cual se optó por este valor fue para mantener una baja densidad, y para que el VIDRIO sea justamente una carga, dando lugar a que la matriz de PET sea la principal protagonista del material.

La granulometría que se eligió fue una **partícula máxima de 1 [mm]**, ya que es el tamaño promedio de un grano de arena gruesa. Para el caso del VIDRIO la obtención de polvo es sencilla; en cambio, para el caso del PET obtener el polvo es más laborioso y el método utilizado (rallado mecánico manual) demanda tiempo y esfuerzo físico, por eso el tamaño de partícula seleccionado ayuda aliviar la tarea. Ambos materiales son tamizados para uniformar el tamaño y tener un material compuesto lo más homogéneo posible.

8.2.2.- Proceso de fabricación.-

La técnica a emplear para la preparación de los materiales es una técnica de **polvos** que se basa en cuatro etapas fundamentales: primero se obtiene los **polvos** y luego son **mezclados**; se coloca la mezcla en un molde abierto donde se **conforma isotérmicamente** por un tiempo específico para posteriormente **compactarlos en caliente** con ayuda de una prensa hidráulica y dejando enfriar a temperatura ambiente.

En cuanto a los **parámetros** de: tiempo de conformado isotérmicamente, se optó por el mínimo tiempo para fundir la totalidad del material, ya que la exposición a altas temperaturas por tiempo prolongado degradan el PET; modo y tiempo de enfriamiento, se eligió que sea a temperatura ambiente ya que cuanto mayor es el tiempo que tarda en solidificar, más cristalino se vuelve el PET (el material cristalino tiene mejores propiedades mecánicas que el amorfo).

La **adhesión** entre las partículas de refuerzo y la matriz polimérica puede ser atribuida a una serie de mecanismos que se pueden dar en la **interfase**, como fenómenos aislados o por interacción entre ellos. El rasgo más importante de la interfase es la adhesión del material de la matriz al refuerzo; en ausencia de esta adhesión las partículas serán arrancadas de la matriz sin esfuerzo. Debido a las características físicas del PET y el VIDRIO, se espera que el mecanismo de **adhesión mecánica** de la interfase sea el predominante. La interacción se producirá únicamente por la interpenetración mecánica de dos superficies; el termoplástico, una vez líquido, moja cada detalle de la superficie de la partícula.

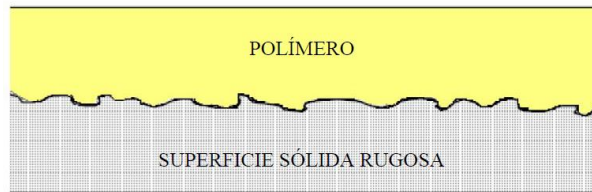


Figura 14.- Adhesión mecánica de interfase.

Para la **compactación** se eligió una presión que permita la adecuada unión de interfaces entre el PET y el VIDRIO, la cual fue obtenida de un trabajo de investigación y la óptima fue de 16 [kg/cm²].

8.2.2.1.- Preparación de los materiales.-

Con el fin de fabricar las probetas necesarias para realizar las pruebas y ensayos contemplados, fue necesario primero generar el **polvo** de PET a partir de botellas de desperdicio. Éste fue obtenido por rayado mecánico (manual), separando el polvo para uniformizar la partícula en un **tamiz** ASTM N°18 (tamaño máximo de 1 [mm]).

Posteriormente el polvo fue mezclado con **partículas** de VIDRIO molido obtenidas a través de molienda mecánica de botellas desechadas, y filtradas con el mismo tamiz que el PET. Efectuando la composición con una proporción del 40% de VIDRIO en peso.



Figura 15.- Polvo de PET.

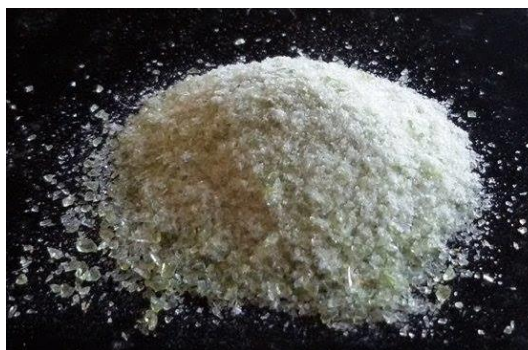


Figura 16.- Polvo de VIDRIO.

A continuación se muestran imágenes del polvo de PET y el VIDRIO molido, con el fin de poner en evidencia su morfología. Estas fueron obtenidas mediante un Microscopio de x20 aumentos (marca KONUS, modelo DIAMOND #5420 y el software asociado Motic Images Plus 2.0)

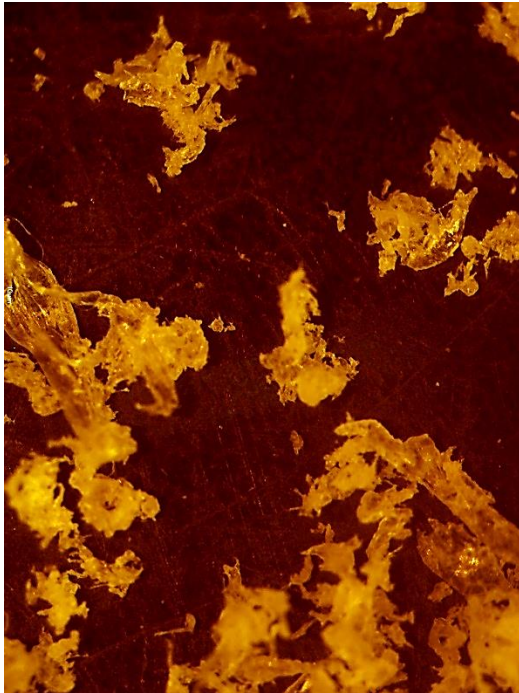


Figura 17.a.- Polvo de PET aumentada x20.

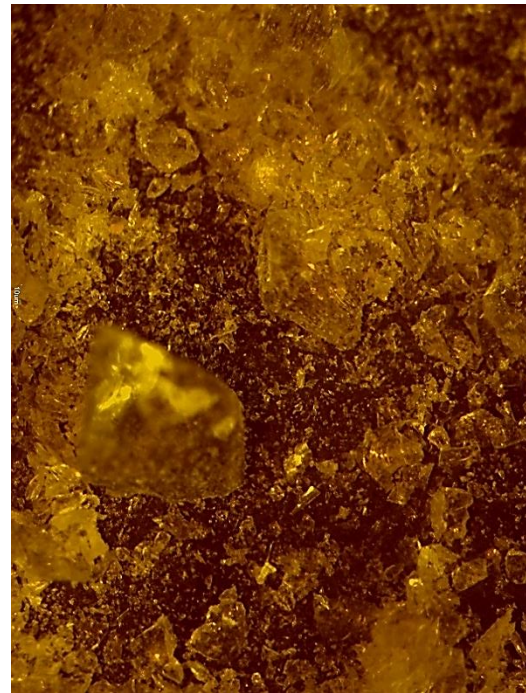


Figura 17.b.- Polvo de VIDRIO aumentado x20.

A simple vista el polvo de PET parece regular y suave al tacto, dando la impresión de un polvo uniforme, pero como se puede observar el PET presenta bordes irregulares, ciertas ramificaciones, tamaño variado. Esto hace que ocupe un mayor volumen ya que quedan espacios libres entre partículas en contacto. Con respecto al VIDRIO molido, se observan bordes regulares, gran diversidad de tamaño y se lo podría asociar a una morfología de “partículas”.

8.2.2.2.-Fabricación de moldes.-

Molde para probetas cilíndricas.-

Se desarrolló un molde de acero en **forma cilíndrica** que permitiera realizar el proceso de fabricación de la manera más sencilla posible. Se tuvo en cuenta los principales **cuidados** en la construcción para el fácil **desmoldado**, ya que se trata de un plástico rígido, los cuales fueron: las superficies en contacto con el PET no deben tener rayas longitudinales, ya que impiden el buen desmolde al hacer de trabas, por eso se pulieron las superficies hasta obtener un acabado óptimo; la base es sujeta por bulones, con el fin de realizar un sello hermético cuando es comprimido el

material, y cuando este esté solidificado, se pueda retirar para permitir el desmolde empujando en el mismo sentido que la compresión realizada. El **pistón** de compresión fue hecho en TEFLON con el fin de reducir rozamientos, corroborando que dicho material soporta la temperatura de trabajo y su resistencia de compresión es mucho mayor a la presión que se sometió el material en cuestión.

Este molde permitió obtener piezas de un diámetro de 2,42 [mm] y una longitud máxima de 55 [mm].



Figura 18.- Molde de acero para probetas cilíndricas.

Molde para probetas cuadradas.-

Como en el caso anterior, se desarrolló un molde de acero en forma **cuadrada** siguiendo los principios para su construcción. En este caso el pistón de compresión fue realizado en chapa de acero, y para reducir el rozamiento, las superficies fueron pulidas.

Este molde permitió obtener piezas de sección cuadrada de 76 [mm] de lado, y una altura máxima de 50 [mm].



Figura 19.- Molde para probetas cuadradas.

8.2.2.3.-Fabricación de las probetas.-

Ambos tipos de probetas, cilíndricas y cuadradas, se realizaron con el mismo instrumental y siguiendo el mismo procedimiento.

El instrumental utilizado fue:

- Horno eléctrico tipo MUFLA trifásico: potencia 4,5[KW], intensidad de corriente 18 [A], frecuencia 550[MHz]. Con control de temperatura monofásico de precisión $\pm 1^\circ$ [C].
- Balanza eléctrica: modelo TH 1000 A, con una precisión de 0,1 [g].
- Prensa hidráulica uniaxial: con capacidad máxima de 1 [tn] y equipada con un manómetro.



Figura 20.- Balanza utilizada.



Figura 21.- Horno eléctrico tipo Mufla utilizado.



Figura 22.- Prensa hidráulica uniaxial utilizada.

Procedimiento llevado a cabo:

- Se realiza el peso del polvo de PET y el de VIDRIO por separado.
- Se colocan los polvos en un recipiente con tapa y se procede a mezclarlos hasta obtener una distribución uniforme.
- Se vierte el polvo mezclado dentro del molde.
- Se coloca el molde en el horno.
- Luego de transcurrido el tiempo mínimo para la total fusión del material, se retira del horno.
- En el menor tiempo posible, se coloca el pistón de compresión dentro del molde y este es puesto en la prensa hidráulica, donde se le da la presión impuesta.
- Se deja enfriar a temperatura ambiente el molde bajo presión.
- Una vez frío el molde, se procede a desmoldar la probeta.

8.2.2.3.1- Probetas realizadas.-

PROBETA CILÍNDRICA PET						
PROBETA Nº	PESO [g]	TEMPERATURA HORNO [°C]	TIEMPO HORNO [min]	TIEMPO PRENSADO [min]	PRESIÓN [kg/cm ²]	TIEMPO DESMOLDE [min]
1	23,5	251	25	<1	16	25
2	14,5		40			25
3	15		40			25
4	15		20			25
5	15,5		30			25
6	16,5		25			15
7	16,5		45			15
8	16,5		50			15
9	16,5		20			15
10	16,5		35			15

Tabla 2.- Datos de las probetas cilíndricas de PET realizadas.

PROBETA CILÍNDRICA PET+VIDRIO						
PROBETA Nº	PESO [g]	TEMPERATURA HORNO [°C]	TIEMPO HORNO [min]	TIEMPO PRENSADO [min]	PRESIÓN [kg/cm ²]	TIEMPO DESMOLDE [min]
1	30	251	60	<1	16	30
2	39		50			30
3	36,9		70			30
4	37		70			30
5	37		80			20
6	20		25			15
7	20		30			15
8	20		35			15
9	20		50			15
10	20,6		50			15

Tabla 3.- Datos de las probetas cilíndricas de PET con VIDRIO realizadas



Figura 23.- Probeta cilíndrica.

Bajo los mismos parámetros de temperatura y presión se realizó una probeta cuadrada de 76 [mm] de lado y espesor de 5 [mm] de PET, y una de iguales característica de PET con VIDRIO, y, una de cada una de 10 [mm] de espesor.



Figura 24.- Probeta cuadrada.

8.2.2.3.2.- Observaciones sobre las probetas fabricadas.-

Luego de realizar un número considerable de probetas, tanto de PET como de PET con VIDRIO, bajo la modalidad de “prueba y error” se puede apuntar varios conceptos a tener en cuenta para mejorar la elaboración:

- El **tiempo** que permaneció cada probeta fue distinto. Se le puede atribuir a que se utilizó un horno eléctrico tipo MUFLA, el cual genera un flujo de calor hasta llegar a la temperatura de servicio y luego mantiene la temperatura, principalmente por su gran aislación, y cuando es necesario mediante un nuevo flujo de calor. Lo que hace que el flujo de calor no sea continuo, por eso se observa que las probetas que se hicieron cuando el horno estaba frío (se proporciona el mayor flujo para alcanzar la temperatura deseada) son las que menos tiempo demandaron. Las probetas que se realizaron en segunda, tercera y cuarta ocasión, los tiempos se incrementaron considerablemente.
- La **cantidad** de material colocado en el molde también influyó sobre el tiempo de permanencia en el horno.
- El **acabado superficial** de pulido favoreció el fácil desmolde como se había previsto, además, el material lo copio dando una terminación superficial de las probetas liso muy bueno.
- El **material compuesto** de PET con VIDRIO demandó más tiempo en el horno, lo cual es razonable ya que ambos materiales poseen coeficiente de conductividad térmica distintos, lo cual hace que la absorción de calor no sea uniforme.
- Algunas probetas presentaron burbujas de **aire** en su interior, denominadas “bóvedas”. El problema se solucionó de manera parcial al realizarle un orificio de escape de aire al pistón de compresión, y al disminuir el tiempo que transcurría entre cuando se retira el molde del horno y se le aplica la presión.

8.3.- Caracterización.-

La caracterización del material compuesto se realizó mediante **comparación**, con respecto al PET. Realizando probetas y ensayos en **igualdad de condiciones**. Si bien existen normas para realizar dichos ensayos, en algunos casos no se pudieron aplicar por no contar con los instrumentales necesarios, por lo cual se trató de realizarlos de la manera más próxima posible.

Cabe destacar que el fin de los ensayos es más de carácter **cuantitativo** que cuantitativo, es decir, se busca poner en evidencia las características que cambian con la presencia de la carga.

8.3.1.- Ensayos y normas.

8.3.1.0.- Caracterización microestructural.-

- Microscopía óptica.

La caracterización microestructural es una parte integral de la ciencia de los materiales, considerándose como la observación y la descripción de la materia. Mediante este ensayo se buscó conocer la distribución del VIDRIO en el PET.

Instrumental utilizado:

- Microscopio óptico: marca KONUS, modelo DIAMOND #5420, lente de x40 aumentos, software asociado Motic Images Plus 2.0.



Figura 25.- Microscopio óptico utilizado.

Datos obtenidos:

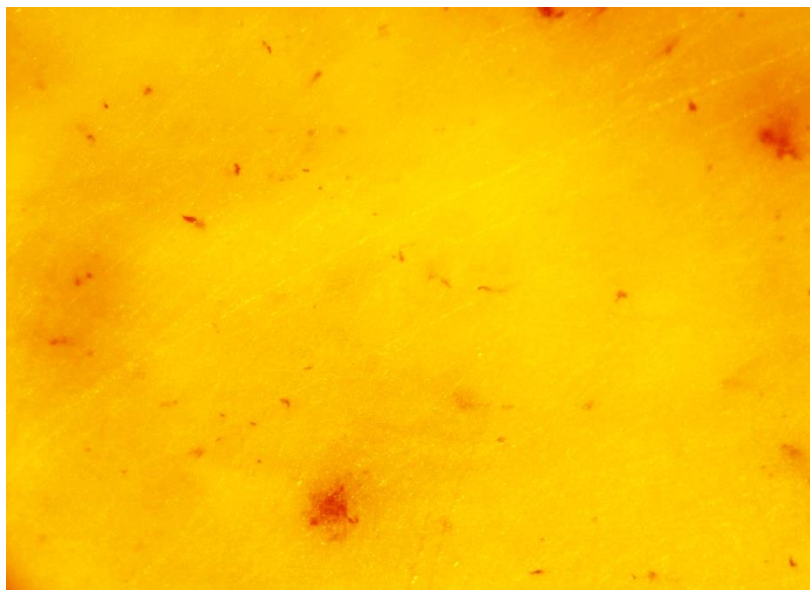


Figura 26.- Muestra de PET aumentada x40.

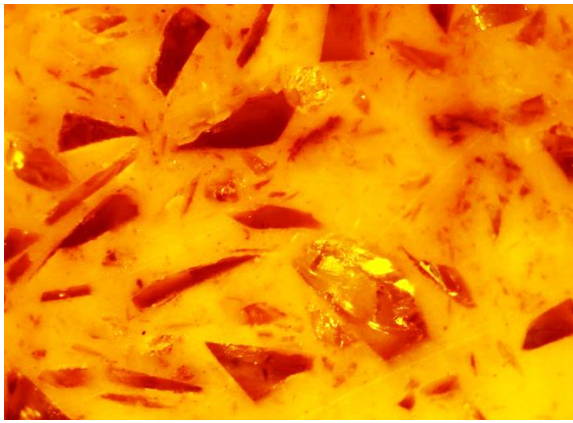


Fig. 27.- Muestra de PET con VIDRIO N°1 aumentada x40.

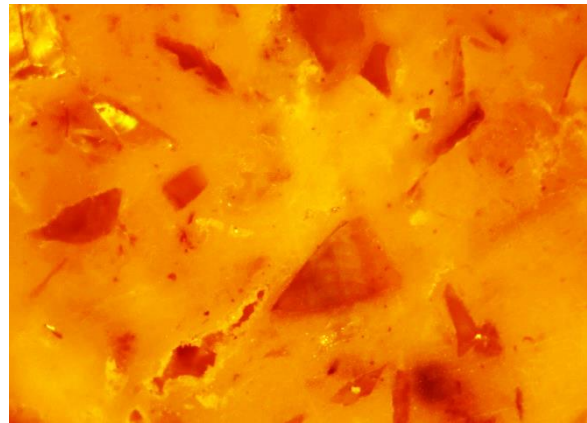


Fig. 28.- Muestra de PET con VIDRIO N°2 aumentada x40.

8.3.1.1.- Caracterización física.-

- Densidad aparente.
- Absorción de agua: ASTM D570 1984, aplicada en pruebas de absorción de agua en plásticos.
- Conductividad térmica: ASTM D5930 Ensayo de Conductividad Térmica en Plásticos Moldeados.

8.3.1.1.1.- Densidad aparente.-

La densidad aparente es una magnitud aplicada en materiales porosos, los cuales forman cuerpos heterogéneos con intersticios de aire u otra sustancia normalmente más ligera, de forma que la densidad total del cuerpo es menor que la densidad del material poroso si se compactase.

Instrumental utilizado:

- Balanza eléctrica: modelo TH 1000 A, con una precisión de 0,1 [g].
- Calibre: marca ESSEX, precisión 0,05 [mm].

Procedimiento seguido:

- Se pesó cada muestra.
- Se tomó medida del diámetro y longitud.
- Se calculó la densidad.

Datos obtenidos:

PET+VIDRIO					
PROBETA	PESO [g]	DIÁMETRO [cm]	LONGITUD [cm]	VOLUMEN [cm ³]	DENSIDAD [g/cm ³]
1	29	2,42	4,13	19,00	1,53
2	38,8	2,42	5,36	24,65	1,57
3	35,8	2,42	5,1	23,46	1,53
4	35,3	2,42	5,1	23,46	1,50
5	19,2	2,42	2,68	12,33	1,56
6	19,5	2,42	2,7	12,42	1,57
7	19,3	2,42	2,74	12,60	1,53
8	19,7	2,42	2,7	12,42	1,59
9	19,2	2,42	2,66	12,23	1,57
PROMEDIO					1,55

Tabla 4.- Datos de densidad de las probetas de PET con VIDRIO.

PET					
PROBETA	PESO [g]	DIÁMETRO [cm]	LONGITUD [cm]	VOLUMEN [cm ³]	DENSIDAD [g/cm ³]
1	22,5	2,42	4	18,40	1,22
2	14,1	2,42	2,44	11,22	1,26
3	14,3	2,42	2,5	11,50	1,24
4	15,8	2,42	2,74	12,60	1,25
5	14,2	2,42	2,51	11,55	1,23
6	14,6	2,42	2,54	11,68	1,25
7	15,6	2,42	2,73	12,56	1,24
8	16,2	2,42	2,82	12,97	1,25
9	16,2	2,42	2,83	13,02	1,24
10	16	2,42	2,86	13,15	1,22
11	16,1	2,42	2,8	12,88	1,25
PROMEDIO					1,24

Tabla 5.- Datos de densidad de las probetas de PET.

La variación entre muestras en el caso del PET, se le puede adjudicar principalmente a la presencia de “bóvedas de aire” y en menor magnitud a las impurezas que se puedan llegar a encontrar. En el caso de PET con VIDRIO, la dispersión no solo se la relaciona con la presencia de las “bóvedas de aire” e impurezas, sino que la granulometría elegida para el VIDRIO se hizo en base a un tamaño máximo y no teniendo mínimo, por eso se encontró una gran variedad de tamaño de partículas, por lo que no todas las muestras contaban con el mismo tamaño de partícula.

Cabe destacar también que la variación de valores obtenidos se puede deber al grado de cristalización de cada probeta, ya que se sabe que la densidad depende de factores como el grado de empaquetamiento, el proceso de síntesis y la disposición de la molécula, los cuales son afectados por

el grado de cristalización del material. Por su parte, el porcentaje de cristalinidad en el PET depende de la temperatura y el tiempo en que se realiza el enfriamiento, cuyas variables se trataron de unificar para todas las probetas.

8.3.1.1.2.- Absorción de agua.-

El ensayo se desarrolló con el objetivo de conocer el porcentaje de absorción de agua del nuevo material, ya que es una característica principal de los materiales utilizados en la construcción, debido a que se lo asocia con la “impermeabilidad”.

Se siguió el procedimiento establecido en la norma ASTM D570 1984, aplicada en pruebas de absorción de agua en plásticos, con la diferencia que la precisión de la balanza era menor.

Instrumental utilizado:

- Balanza eléctrica: modelo TH 1000 A, con una precisión de 0,1 [g].
- Agua destilada.
- Recipiente.

Procedimiento seguido:

- Comprobar que todas las muestras estén limpias y libres de partículas desprendidas.
- Se pesó cada muestra y se las enumeró.
- Se colocaron las muestras en un recipiente y luego se vertió el agua destilada, haciendo que esta las sobrepase por unos 3 [cm]. Las probetas no flotaron, por lo cual no se requirió de un peso extra para que queden totalmente sumergidas.
- Se tomaron los datos de temperatura y humedad del ambiente.
- Se dejó reposar por 24 horas.
- Posteriormente se volvió a tomar la temperatura y la humedad ambiental.
- Se retiró una muestra, se la pasó por un paño para quitar el resto del agua sobre la superficie y se pesó. Este trabajo se realizó con cada probeta.

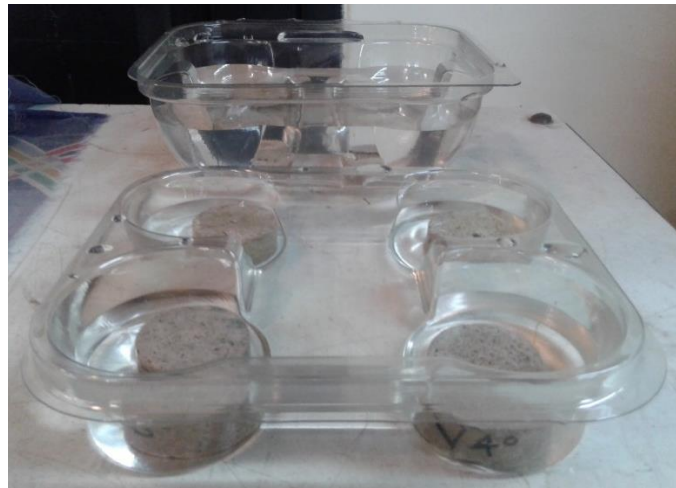


Figura 29.- Ensayo de absorción de agua.

Datos obtenidos:

TIEMPO [Hs]	TEMPERATURA [° C]	HUMEDAD [%]
0	28	30
24	27	35

Tabla 6.- Parámetros ambientales durante el ensayo.

PET			
PROBETA	PESO INICIAL [g]	PESO FINAL [g]	% ABSORCIÓN
1	7,7	7,7	0
2	7,2	7,2	0
3	7,3	7,3	0
4	6,7	6,7	0

Tabla 7.- Datos de absorción de agua para las probetas de PET.

PET+VIDRIO			
PROBETA	PESO INICIAL [g]	PESO FINAL [g]	% ABSORCIÓN
1	9,6	9,6	0
2	12,6	12,6	0
3	9,9	9,9	0
4	7,3	7,3	0

Tabla 8.- Datos de absorción de agua para probetas de PET con VIDRIO.

8.3.1.1.3.- Conductividad térmica.-

Se conoce que los plásticos tienen bajo coeficiente de conductividad térmica, así como los vidrios. Por eso se realizó un ensayo experimental de conductividad térmica, comparando ambos materiales, con el fin de conocer la influencia del VIDRIO en la matriz de PET.

Como no se contaba con los recursos necesarios para realizar el ensayo bajo norma, se buscó una alternativa, la cual derivó en un ensayo experimental: es posible determinar la conductividad térmica de un material en particular, mediante la medición del tiempo de transferencia de una cantidad de calor conocida que pasa a través de una lámina constituida del material en cuestión, la ecuación que describe este proceso es la llamada Ley de Fourier.

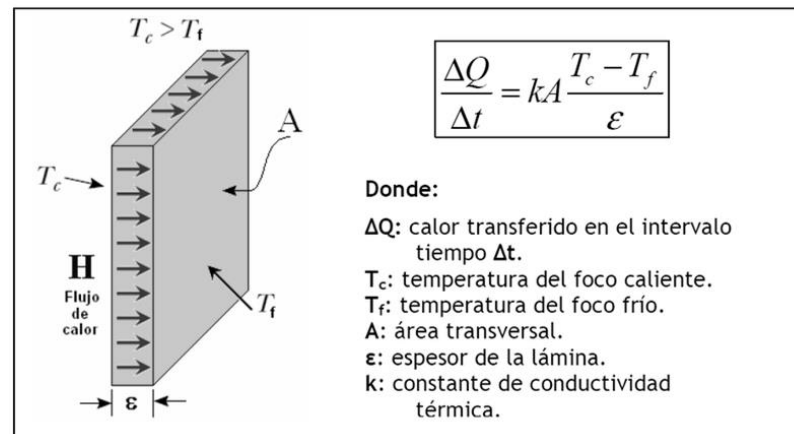


Figura 30.- Esquema representativo del flujo de calor a través de una superficie, y la ley de Fourier.

Instrumental utilizado:

- Balanza eléctrica: modelo TH 1000 A, con una precisión de 0,1 [g].
- Calibre: marca ESSEX, precisión 0,05 [mm].
- Multitester digital: marca UNI-T, modelo UT33 SERIES.
- Cámara de vapor.
- Cronómetro.

Procedimiento seguido:

- Se midió y registro el espesor de la lámina del material a medir.
- Se ubicó el material de prueba sobre el orificio de la cámara de vapor.
- Se midió el diámetro del bloque de hielo y se registró este valor. Se ubicó el hielo en la parte superior de la lámina, apoyando la parte más plana y observando que el contacto térmico sea adecuado.
- Se esperó hasta que comenzó la fusión del hielo, para evitar que algunas zonas del hielo puedan estar a una temperatura menor a 0°C.
- En un recipiente de masa conocida, se recogió el agua producida por el deshielo durante 10 minutos y se pesó la masa del agua que cayó al recipiente bajo estas condiciones y se registró su valor. Con este se conoce el calor que aporta el ambiente.

- Se conectó la fuente de vapor y se esperó hasta que comenzó a salir vapor por el desagüe del foco caliente.
- Una vez alcanzado el estado estacionario, se midió el tiempo durante el cual se recogió agua en esta nueva condición. Como en el caso anterior, se trató de 10 minutos.
- Una vez terminada la experiencia, se midió la masa de agua fundida, y nuevamente el diámetro del bloque de hielo.

Para evitar introducir un error en el salto térmico, la temperatura dentro de la cámara de vapor fue medida mediante un Tester.



Figura 31.- Dispositivo utilizado para el ensayo de conductividad térmica.

Datos obtenidos:

PET e=0,0045 [m]				
TIEMPO [seg]	Øi HIELO [m]	Øf HIELO [m]	TEMPERATURA [° C]	PESO [g]
600	0,04	0,032	22	12,5
600	0,034	0,032	98	26,8
600	0,04	0,034	24	10,8
600	0,035	0,032	97	37

Tabla 9.- Datos obtenidos para la probeta de PET para el ensayo de conductividad térmica.

PET+VIDRIO e=0,005 [m]				
TIEMPO [seg]	Øi HIELO [m]	Øf HIELO [m]	TEMPERATURA [° C]	PESO [g]
600	0,04	0,032	24	10,6
600	0,034	0,034	98	28,3
600	0,049	0,048	23	10,9
600	0,04	0,038	97	36

Tabla 10.- Datos obtenidos para la probeta de PET con VIDRIO para el ensayo de conductividad térmica.

8.3.1.2.- Caracterización mecánica.-

- Resistencia a la compresión: ASTM D695 1984, aplicada en pruebas de compresión para plásticos rígidos. ISO 604:2002, PLÁSTICOS - MÉTODOS DE PRUEBA.
- Resistencia al impacto: ASTM D256 1984, aplicada en pruebas de resistencia al impacto por el método Izod.

8.3.2.2.1.- Resistencia a la compresión.-

El ensayo de compresión se realizó con el fin de saber cómo afecta la resistencia a la compresión la carga de VIDRIO en el PET. Con respecto al módulo de elasticidad, relación deformación-esfuerzo, no va a ser calculado ya que no es un dato relevante para el fin que se estudia el material.

En un principio se utilizaron probetas según establece la norma ASTM D695, con un diámetro de 12,7 [mm] y una longitud igual al doble de dicho diámetro. Según se investigó, la norma ISO 604 propone una relación 1 a 1 con respecto al diámetro y la longitud, con un diámetro de 10 [mm]. Observando que por la naturaleza del material compuesto, estos diámetros son pequeños para que el material se comporte de manera adecuada, se optó por realizar probetas de relación 1 a 1 con una medida de 24,2 [mm]. Cabe destacar que en un principio las probetas tenían dimensiones superiores a las utilizadas en el ensayo, por lo cual fueron mecanizadas mediante un torno paralelo para obtener las correspondientes medidas.



Figura 32.- Probeta cilíndrica relación 2:1.



Figura 33.- Probeta cilíndrica relación 1:1.

Instrumental utilizado:

- Máquina de compresión: marca Alfred J.Ausler y Cia, capacidad utilizada 5000 [kg].



Figura 34.- Maquina de utilizada para el ensayo de compresión.

Procedimiento seguido:

- Se realizó una muestra con 10 probetas para cada material.
- La velocidad del ensayo fue de 1,3 [mm/min] como establece la norma.
- Cada ensayo finalizo con la rotura de la probeta, obteniendo así el valor de carga máxima, utilizado para calcular la resistencia a la compresión.



Figura 35.- Probeta a ensayar bajo compresión.

Datos obtenidos:

PET					
PROBETA	TIEMPO [min]	CARGA [kg]	ÁREA [cm ²]	MÓDULO [kg/cm ²]	OBSERVACIÓN
1	40	3540	11,13	318,03	Fractura frágil
2	40	2925	11,13	262,78	Hueca
3	40	4100	11,13	368,34	Descascaró
4	20	3160	11,13	283,89	Fractura frágil
5	30	2570	11,13	230,89	Hueca
6	25	3450	11,13	309,94	Fractura frágil
7	45	3570	11,13	320,72	Fractura frágil
8	50	2400	11,13	215,61	Hueca
9	20	2980	11,13	267,72	Hueca
10	35	3950	11,13	354,86	Descascaró

Tabla 11.- Datos obtenidos para las probetas cilíndricas de PET para el ensayo de compresión.

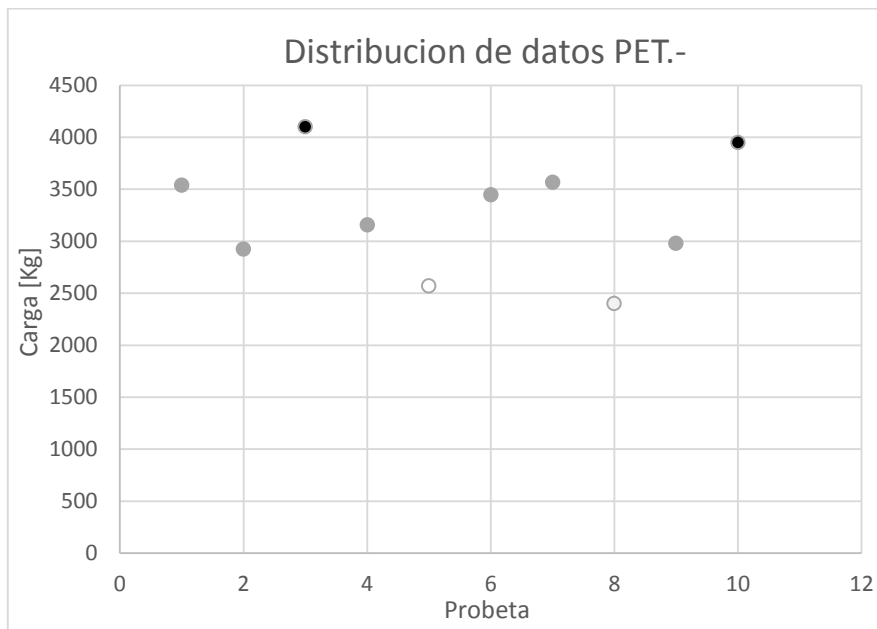


Gráfico 1.- Valores de carga obtenidos en las diferentes probetas de PET.

PET+VIDRIO					
PROBETA	TIEMPO [min]	CARGA [kg]	ÁREA [cm ²]	MÓDULO [kg/cm ²]	OBSERVACIÓN
1	60	3215	11,13	288,83	Falla barril
2	30	1970	11,13	176,98	Hueca
3	50	3880	11,13	348,57	Falla barril
4	70	3520	11,13	316,23	Falla barril
5	80	1410	11,13	126,67	Hueca
6	25	3160	11,13	283,89	Falla barril
7	45	3100	11,13	278,50	Falla barril
8	50	3360	11,13	301,86	Falla barril
9	20	2760	11,13	247,96	Falla barril
10	35	2660	11,13	238,97	Falla barril

Tabla 12.- Datos obtenidos para las probetas cilíndricas de PET con VIDRIO para el ensayo de compresión.

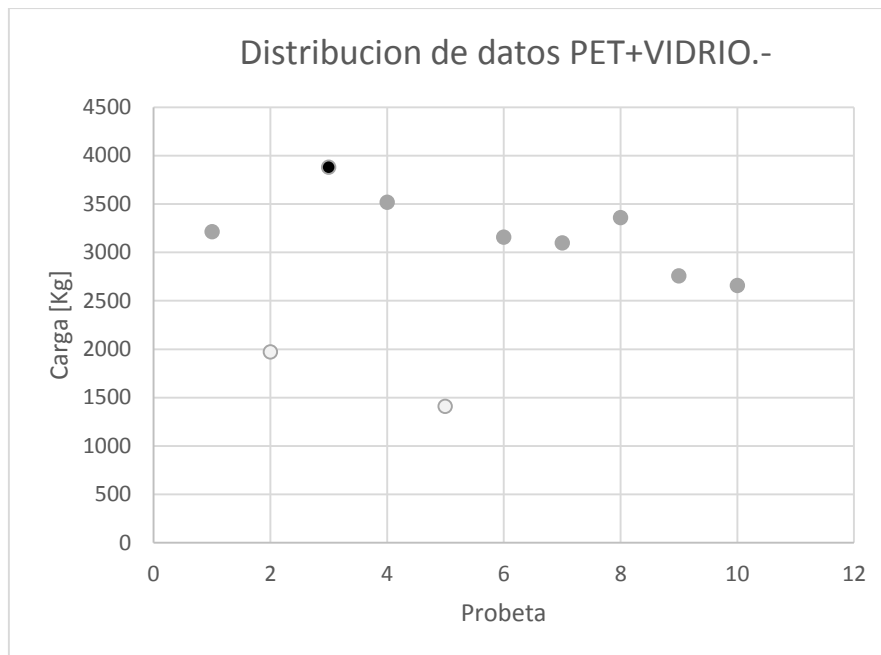


Gráfico 2.- Valores de carga obtenidos en las diferentes probetas de PET.

La dispersión en los datos obtenidos se le puede atribuir en parte a la presencia de poros o “bóvedas de aire” originadas en el proceso de fabricación, las mismas se deben principalmente a la morfología de las partículas de PET, las cuales presentan ramificaciones haciendo que el contacto entre ellas sea mínimo y quedando muchos espacios vacíos. Además de que el PET fundido tiene baja fluidez, lo que hace difícil que el aire que está atrapado en su interior salga por sí solo. Otro factor que pudo haber intervenido en la diversidad de valores, fue el tiempo de permanencia en el horno: se notó que las piezas que fueron expuestas a mayor tiempo presentaron una coloración más oscura, debida a la degradación (carbonización parcial) del material cuando es sometido a alta temperatura un tiempo prolongado. Otro factor que puede haber influido es el apoyo, ya que una de las caras fue mecanizada puede que no se haya logrado el total paralelismo entre ambas caras.

Cabe destacar también que la variación de valores obtenidos se puede deber al grado de cristalización de cada probeta como se mencionó en el caso de la densidad, ya que se sabe que los materiales que presentan mayor grado de estructura cristalina tienen mejores propiedades mecánicas.

8.3.2.2.2.- Resistencia al impacto.-

El ensayo de impacto se utiliza para conocer la tenacidad de un material, es decir, la capacidad de absorber energía antes de romperse. En el caso del material en estudio, es importante saber cómo afecta la presencia de partículas de VIDRIO.

La norma ASTM D256 se aplica a plásticos ensayados bajo el método Izod. El departamento de materiales cuenta con una máquina de ensayo de impacto con péndulo Izod, pero la misma es para metales, por lo que la capacidad (en energía) es mucho mayor a la necesaria para los plásticos, por lo cual no pudo ser utilizada. Como alternativa, se montó un dispositivo para realizar la prueba mediante caída libre de un peso conocido. Las probetas fueron realizadas como establece la norma, con su entalla correspondiente.

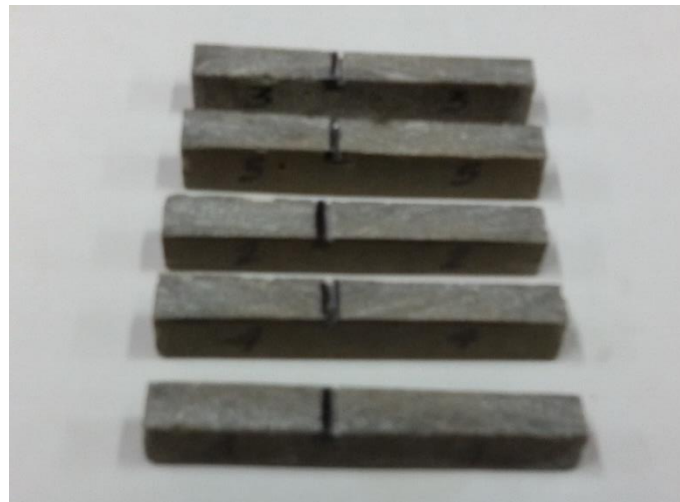


Figura 36.- Probetas utilizadas en el ensayo de impacto.

Dispositivo utilizado para el ensayo:

- Morsa paralela: utilizada para la sujeción de la probeta.
- Tubo de polipropileno: guía del impactador, con esto se aseguró que siempre se golpee en el mismo lugar.
- Impactador: de forma cilíndrica y de peso conocido.



Figura 37.- Dispositivo utilizado para el ensayo de impacto.

Procedimiento seguido:

- Se colocó la probeta en la morsa, con la entalla en la parte superior.
- Se deja caer el impactador desde una altura conocida.
- Se observa si la muestra rompe o no rompe.



Figura 38.- Fijación de la probeta de impacto.

Datos obtenidos:

PET			
PROBETA	LADO A [mm]	ENTALLA (A) [mm]	LADO B [mm]
1	11,2	10,3	10,2
2	12,3	10,3	10,2
3	12,2	10,3	10,2
4	12,2	10,3	10,4
5	12,3	10,3	10,6

Tabla 13.- Probetas de PET para el ensayo de impacto.

PET		
PROBETA	ALTURA [cm]	OBSERVACIÓN
1	20	ROMPE
2	5	ROMPE
3	2	NO ROMPE
4	3	ROMPE
5	3	ROMPE

Tabla 14.- Resultados del ensayo de impacto para probetas de PET.

PET+VIDRIO			
PROBETA	LADO A [mm]	ENTALLA (A) [mm]	LADO B [mm]
1	11,8	10,3	10,5
2	11,7	10,3	10,6
3	12,3	10,3	10,2
4	12,5	10,3	10,3
5	13	10,3	10,2

Tabla 15.- Probetas de PET con VIDRIO para el ensayo de impacto.

PET+VIDRIO		
PROBETA	ALTURA [cm]	OBSERVACIÓN
1	5	ROMPE
2	4	NO ROMPE
3	4	NO ROMPE
4	5	ROMPE
5	5	FISURA/ROMPE

Tabla 16.- Resultados del ensayo de impacto para probetas de PET con VIDRIO.

9.- RESULTADOS.-

9.1.- Caracterización microestructural.-

Como se puede observar, la muestra de PET es un material homogéneo donde se evidencian partículas de impurezas, que pueden haber sido introducidas en la etapa de rallado principalmente.

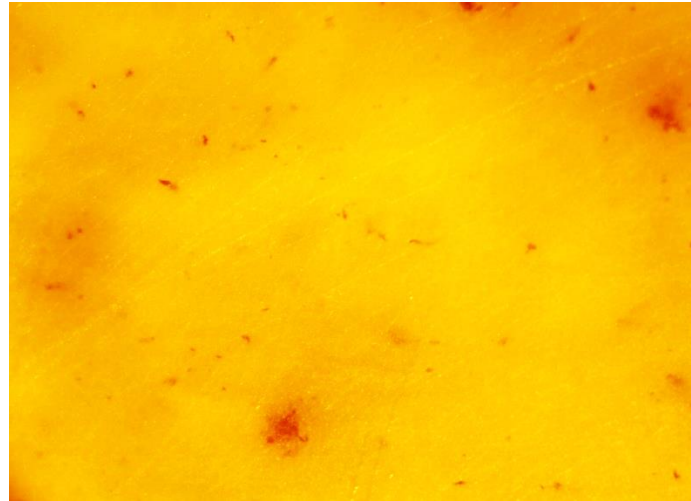


Figura 39.- Muestra de PET aumentada x40.

En el caso del material compuesto, se ve claramente la distribución del VIDRIO en la matriz de PET es totalmente aleatoria, presentando zonas con mayor presencia de partículas que otras. Además se puede observar poros, que pueden ser debidos a las “bóvedas de aire” o bien, al cortar la muestra puede que se haya desprendido una partícula de vidrio dejando la cavidad.



Figura 40.- Muestra de PET con VIDRIO aumentada x40. Las cavidades se encuentran encerradas.

9.2.- Caracterización física.-

9.2.1.- Densidad aparente.-

Como era de esperar, la densidad del material compuesto es mayor a la de PET debido a la presencia de VIDRIO. En comparación con el PET comercial el valor del material nuevo no es mucho mayor, y si hablamos de un PET semicristalino (densidad aproximada 1,51 [g/cm³]) el valor es levemente superior.

	DENSIDAD [g/cm ³]
PET	1,24
PET+VIDRIO	1,55

Tabla 17.- Densidades obtenidas.

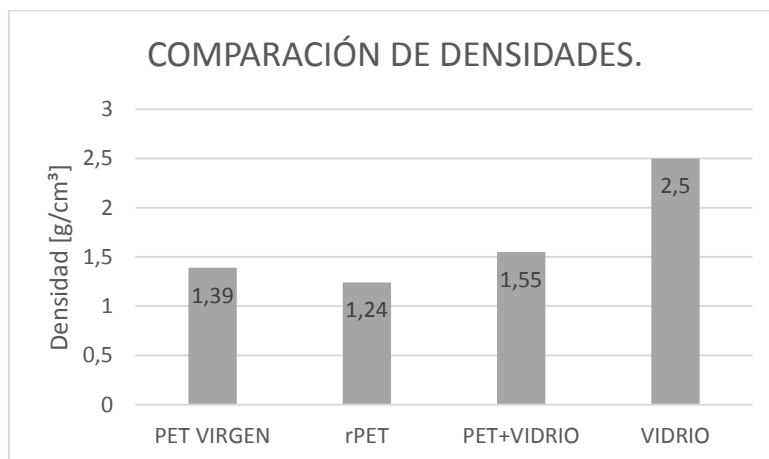


Gráfico 3.- Comparación de densidades.

9.2.2.- Absorción de agua.-

El valor de absorción de agua que se obtuvo con el ensayo de 24 horas de inmersión indica que la presencia del VIDRIO no afecta esta característica del PET. Este resultado era de esperar ya que el vidrio también es un material impermeable al agua.

	% ABSORCIÓN
PET	0
PET+VIDRIO	0

Tabla 18.- Porcentaje de agua absorbida obtenida.

Debida a la precisión de la balanza que se utilizó, se puede decir que la absorción de agua es menor al 0,1%, ya que la precisión de la balanza era de 0,1 [g] y se utilizaron probetas que rondaban los 10 [g] de peso.

9.2.3.- Conductividad térmica.-

El coeficiente de conductividad térmica para el material compuesto dio mayor al del PET en un valor cercano al 30%. Este resultado era de esperarse ya que el VIDRIO tiene un coeficiente, de dos a tres veces, el del PET.

	PET+VIDRIO	PET	RELACION	% AUMENTO K
K [W/m.°C]	0,34 / 0,37	0,27 / 0,29	1,29 / 1,27	29 / 27

Tabla 19.- Datos y resultado obtenidos para la conductividad térmica.

9.3.- Caracterización mecánica.-

9.3.1.- Resistencia a la compresión.-

La resistencia de compresión prácticamente no se vio afectada por la carga de VIDRIO, ya que el material compuesto dio un valor del 1% menor.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	[kg/cm ²]	[MPa]
PET	293,27	28,76
PET+VIDRIO	288,1	28,25

Tabla 20.- Resultados del ensayo de compresión.

La principal diferencia que se obtuvo en el ensayo de compresión fue el modo de rotura o falla de ambos materiales. El PET, al tratarse de un plástico rígido tuvo falla del modo frágil, caracterizada por la explosión de las piezas (Figura 41). En cambio, el PET con VIDRIO tuvo una falla del tipo barril, se podría decir que una falla más “dúctil”, ya que la probeta no explota, sino que mantiene los planos unidos aun después de la falla (Figura 43; 44). Este tipo de rotura se da principalmente en el hormigón (Figura 46; 47). Ambos casos se ponen en evidencia mediante las fotos tomadas.



Figura 41.- Probetas de PET con falla frágil.



Figura 42.- Probetas de PET. La de la izquierda descascaró, las otras presentan bóvedas de aire.



Figura 43.- Probetas de PET con VIDRIO. Falla tipo barril, por planos.



Figura 44.- Probeta de PET con VIDRIO. Pone en evidencia la falla por planos.



Figura 45.- Probeta de PET con VIDRIO. Uno de los planos separados de la fisura ocasionada en el ensayo.



Figura 46.- Probeta de PET con VIDRIO.



Figura 47.- Probeta de hormigón.

9.3.2.- Resistencia al impacto.-

El ensayo de impacto dio como resultado que el material compuesto de PET con VIDRIO es más tenaz, es decir, es capaz de absorber mayor energía. En cuanto a los valores que se obtuvieron, se puede decir que no son representativos de manera cuantitativa, sino cualitativa, por lo que podemos decir que el material compuesto es capaz de absorber el doble de energía que el PET. Este resultado se puede suponer como verdadero ya que se corresponde con el modo de falla obtenido en el ensayo de compresión.

	ALTURA [cm]	ENERGIA [J]
PET	2	0,019
PET+VIDRIO	4	0,039

Tabla 21.- Resistencia al impacto obtenida.

En las imágenes podemos observar que el modo de falla es similar para ambos materiales, lo cual es correcto ya que en ambos casos es el PET quien sufre la falla.

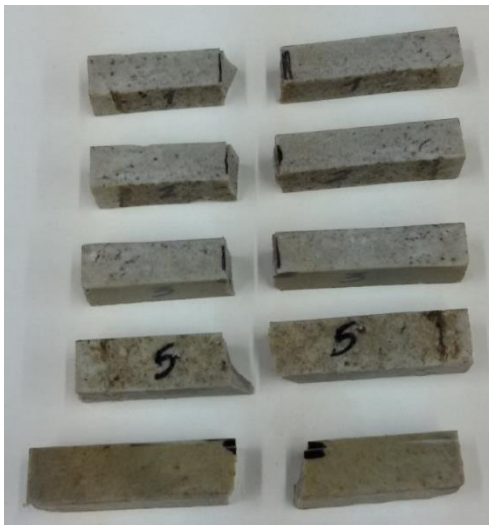


Figura 48.- Probetas de PET ensayadas.



Figura 49.- Probetas de PET con VIDRIO ensayadas.

10.- CONCLUSIONES.-

En este proyecto se ha utilizado envases reciclados para generar un material compuesto con matriz de PET y VIDRIO molido como carga. Las muestras se realizaron bajo el procedimiento que se consideró mejor para los recursos que se disponían. Los ensayos que se realizaron fueron de carácter cualitativo con el fin de caracterizar el material compuesto, mediante propiedades físicas y mecánicas, en comparación con el PET. Luego del trabajo realizado, y proponiendo como fin del material ser un componente constructivo para reemplazar los tradicionales, se está en condición de detallar las siguientes conclusiones:

- Variando los parámetros de granulometría y porcentaje de peso del VIDRIO en la matriz de PET se puede obtener un gran abanico del material compuesto propuesto.
- El valor de densidad que se obtuvo es levemente menor al ladrillo macizo tradicional y considerablemente menor al bloque de hormigón, pero es superior a la densidad del ladrillo cerámico hueco. Por lo que se puede decir que es un valor aceptable si se utiliza para las mismas funciones.

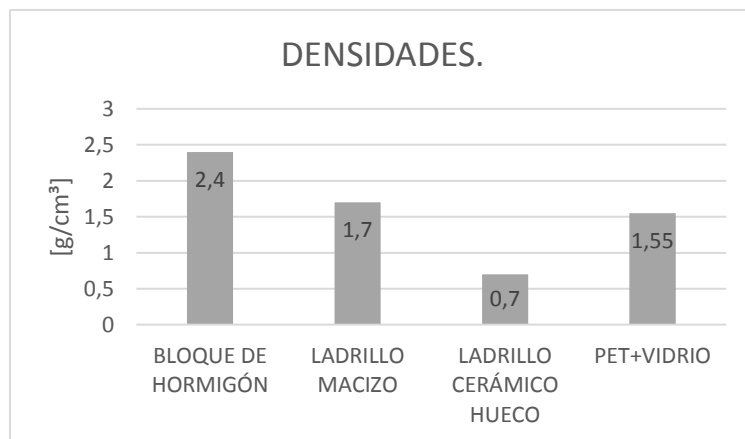


Gráfico 4.- Comparación de densidades con materiales tradicionales de la construcción.

Se realizó un cálculo básico para tener una idea de cuantos envases de PET y de VIDRIO se necesitan para obtener un ladrillo macizo de medidas estándares. Considerando que un envase de 2,25 litros de PET pesa en promedio 70 gramos; un envase de 0,75 litros de VIDRIO pesa en promedio unos 400 gramos; tomando como medidas estándares de un ladrillo macizo 25x12x5,5 centímetros, se tiene que se necesitan aproximadamente 22 envases de PET y 2 envases y medio de VIDRIO.

- El material compuesto al estar realizado con materiales impermeables como el PET y el VIDRIO tiene una absorción de agua menor al 0,1% en peso, lo cual es una gran ventaja frente a los componentes de construcción tradicionales, ya que la humedad no sería un problema a considerar si se utilizaran ladrillos hechos de PET con VIDRIO.

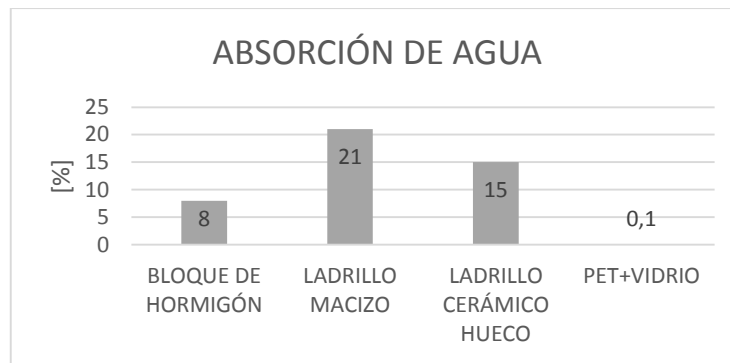


Gráfico 5.- Comparación de absorción de agua con materiales tradicionales de la construcción.

- Con respecto a la aislación térmica se puede decir que sería un excelente material para tal fin, ya que su valor de conductividad térmica es menor a cualquier componente tradicional. Lo que significaría un ahorro energético tanto en calefacción como en acondicionamiento, logrando el mismo confort térmico.

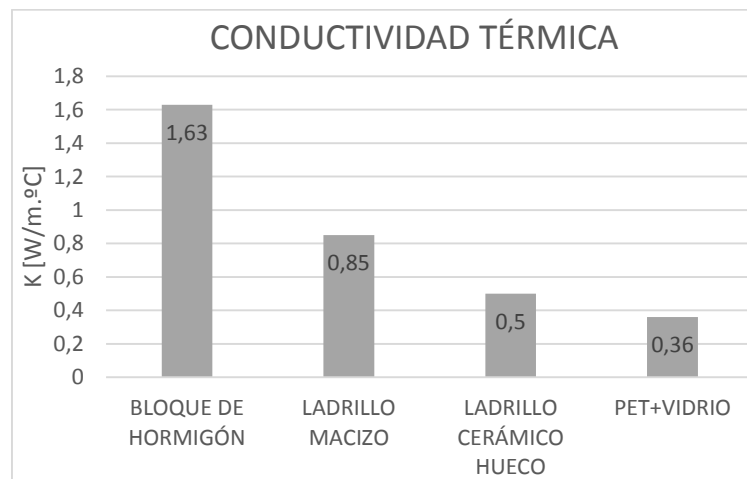


Gráfico 6.- Comparación de conductividad térmica con materiales tradicionales de la construcción.

- Por el alto valor de resistencia a la compresión que presenta se puede utilizar como material portante, por lo cual se estima que se podría usar en piezas estructurales. También se utilizaría en construcciones independientes de estructuras.

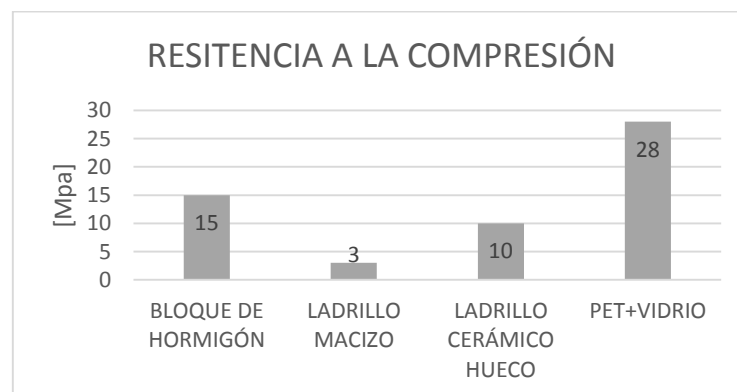


Gráfico 7.- Comparación de resistencia a la compresión con materiales tradicionales de la construcción.

- La presencia de partículas de VIDRIO como carga mejora la resistencia al impacto, por lo que se obtuvo un material de mayor tenacidad que el PET. Este dato puede ser de importancia en construcciones en zonas sísmicas.
- Conociendo la durabilidad del PET (se estiman 500 años para su descomposición) a la intemperie, y la del VIDRIO (mayor a 4.000 años), se considera un material apto para persistir en el tiempo y capaz de resistir muy bien a la erosión por agentes climáticos.
- Las características del material hacen que sea fácil su aserrado, taladrado y torneado. Estas operaciones se realizaron cuando se hizo el ajuste de dimensiones de las probetas, y fueron llevadas a cabo sin ningún inconveniente, por lo cual se trata de un material versátil.

La degradación del planeta ocasionada por la contaminación puede ser revertida en gran medida si el hombre cambia de mentalidad y toma una postura activa. Esta reflexión es válida para todos los ámbitos, y yendo específicamente al tema de la construcción de viviendas, es necesario revisar las tecnologías que se están usando, para mejorar o suprimir aquellas que consumen recursos no renovables o difícilmente renovables, necesitan demasiada energía o producen contaminación. Analizando los puntos descritos anteriormente, a grandes rasgos se puede decir que el material compuesto de PET con VIDRIO es un material apto para reemplazar los componentes tradicionales de construcción. Se trata de una tecnología que pone en valor envases de PET y de VIDRIO que son desechados, con bajo valor energético de producción; la materia prima se obtiene solamente de residuos, reduciendo la cantidad que se acumula o entierra, y su contaminación consecuente.

11.- LÍNEA DE INVESTIGACIÓN PROPUESTA.-

Para el desarrollo del trabajo realizado se han fijado variables y parámetros, no dando lugar a conocer su influencia en las propiedades con diferentes valores. Por eso, y por la dificultad que se ha encontrado a lo largo del trabajo, se pueden plantear puntos a profundizar en posteriores trabajos de investigación. Dentro de los cuales se destacan:

- Influencia de diferentes granulometrías del VIDRIO.
- Influencia de diferentes porcentajes en peso del VIDRIO.
- Proceso de fabricación.
- Degradación del PET sometido a altas temperaturas durante periodos prolongados.
- Influencia de diferentes presiones en el compactado.
- Influencia del tipo y tiempo de enfriamiento de la pieza.

12.- BIBLIOGRAFIA.-

- W. D. Callister, "Introducción a la Ciencia de Materiales" - Reverté (1995).
- William F. Smith, "Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales Segunda Edición" - McGraw-Hill (1996).
- D. H. Morton-Jones, "Procesamiento de Plásticos" – Limusa (2000).
- "Materiales compuestos. Vol I" - A. Miravete, J. Cuartero (2003).
- "Contaminación Ambiental por ladrillos Artesanales en el Departamento de Puno"- Dina Eva Gutierrez (2014).
- "Información técnica PET"- Automatismo Industrial (2014).
- "ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO - MECÁNICAS DE LADRILLOS ELABORADOS CON PLÁSTICO RECICLADO EN EL MUNICIPIO DE ACACÍAS (META)"- UNIVERSIDAD DE LA SALLE FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL BOGOTÁ D. C. (2007)
- "EL PLÁSTICO RECICLADO COMO ELEMENTO CONSTRUCTOR DE LA VIVIENDA"- Diego Fabricio Aguirre Villacís (2013).
- "CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS A BASE DE PET RECICLADO REFORZADO CON 5 Y 40% EN PESO DE PARTÍCULAS DE ZINC" - Osorio y otros (2012).
- "RESIDUOS SOLIDOS URBANOS ARGENTINA: TRATAMIENTO Y DISPOSICION FINAL SITUACION ACTUAL Y ALTERNATIVAS FUTURAS"- Ing. Gisela Laura González (2010).
- "PROBLEMÁTICA AMBIENTAL PRODUCIDA POR LAS LADRILLERAS"- Soledad Siñani, Bady Mancilla (2004).
- "Aplicación de material plástico reciclado en elementos constructivos a base de cemento"- GAGGINO Rosana, ARGUELLO Ricardo, BERRETTA Horacio (2007).
- http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/pet/propiedades_y_caracteristicas.html.
- <http://www.ceve.org.ar/ttplasticos.html>.
- [http://srv2.fis.puc.cl/mediawiki/index.php/Conductividad_T%C3%A9rmica_\(Fis_152\)](http://srv2.fis.puc.cl/mediawiki/index.php/Conductividad_T%C3%A9rmica_(Fis_152)).
- <http://www.mapfre.com/fundacion/html/revistas/seguridad/n115/articulo4.html>.
- <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.ar/>
- http://www.feriadelasciencias.unam.mx/anteriores/feria21/feria255_01_recicla_tu_pet.pdf.
- http://www.eis.uva.es/~macromol/curso07-08/extrusion/ensayos_y_normativa.htm.
- <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91125275003>.

**13.- ANEXOS.-**

ANEXO A: ASTM D 256-04, "Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics"

ANEXO B: ASTM D 578-98, "Standard Test Method for Water Absorption of Plastics"

ANEXO C: ASTM D 695-02^a, "Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics"

ANEXO D: ISO 604:2002, "PLÁSTICOS - MÉTODOS DE PRUEBA / Parte 5: PROPIEDADES MECÁNICAS / Sección 8: Determinación de las propiedades de compresión."



ANEXO A.-



Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics¹

This standard is issued under the fixed designation D 256; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope*

1.1 These test methods cover the determination of the resistance of plastics to “standardized” (see Note 1) pendulum-type hammers, mounted in “standardized” machines, in breaking standard specimens with one pendulum swing (see Note 2). The standard tests for these test methods require specimens made with a milled notch (see Note 3). In Test Methods A, C, and D, the notch produces a stress concentration that increases the probability of a brittle, rather than a ductile, fracture. In Test Method E, the impact resistance is obtained breakage by flexural shock as indicated by the energy extracted from by reversing the notched specimen 180° in the clamping vise. The results of all test methods are reported in terms of energy absorbed per unit of specimen width or per unit of cross-sectional area under the notch. (See Note 4.)

NOTE 1—The machines with their pendulum-type hammers have been “standardized” in that they must comply with certain requirements, including a fixed height of hammer fall that results in a substantially fixed velocity of the hammer at the moment of impact. However, hammers of different initial energies (produced by varying their effective weights) are recommended for use with specimens of different impact resistance. Moreover, manufacturers of the equipment are permitted to use different lengths and constructions of pendulums with possible differences in pendulum rigidities resulting. (See Section 5.) Be aware that other differences in machine design may exist. The specimens are “standardized” in that they are required to have one fixed length, one fixed depth, and one particular design of milled notch. The width of the specimens is permitted to vary between limits.

NOTE 2—Results generated using pendulums that utilize a load cell to record the impact force and thus impact energy, may not be equivalent to results that are generated using manually or digitally encoded testers that measure the energy remaining in the pendulum after impact.

NOTE 3—The notch in the Izod specimen serves to concentrate the stress, minimize plastic deformation, and direct the fracture to the part of the specimen behind the notch. Scatter in energy-to-break is thus reduced. However, because of differences in the elastic and viscoelastic properties of plastics, response to a given notch varies among materials. A measure of a plastic’s “notch sensitivity” may be obtained with Test Method D by comparing the energies to break specimens having different radii at the base of the notch.

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and are the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties.

Current edition approved May 1, 2004. Published June 2004. Originally approved in 1926. Last previous edition approved in 2003 as D 256 - 03.

NOTE 4—Caution must be exercised in interpreting the results of these standard test methods. The following testing parameters may affect test results significantly:

- Method of fabrication, including but not limited to processing technology, molding conditions, mold design, and thermal treatments;
- Method of notching;
- Speed of notching tool;
- Design of notching apparatus;
- Quality of the notch;
- Time between notching and test;
- Test specimen thickness,
- Test specimen width under notch, and
- Environmental conditioning.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in brackets are for information only.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

NOTE 5—These test methods resemble ISO 180:1993 in regard to title only. The contents are significantly different.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

- D 618 Practice for Conditioning Plastics for Testing
- D 883 Terminology Relating to Plastics
- D 3641 Practice for Injection Molding Test Specimens of Thermoplastics Molding Extrusion Materials
- D 4000 Classification System for Specifying Plastic Materials
- D 4066 Classification System for Nylon Injection and Extrusion Materials
- D 4812 Test Methods for Unnotched Cantilever Beam Impact Resistance of Plastics
- D 5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastic Specimens
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Test Program to Determine the Precision of Test Methods

2.2 ISO Standard:

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard’s Document Summary page on the ASTM website.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

ISO 180:1993 Plastics—Determination of Izod Impact Strength of Rigid Materials³

3. Terminology

3.1 *Definitions*— For definitions related to plastics see Terminology D 883.

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

3.2.1 *cantilever*—a projecting beam clamped at only one end.

3.2.2 *notch sensitivity*—a measure of the variation of impact energy as a function of notch radius.

4. Types of Tests

4.1 Four similar methods are presented in these test methods. (See Note 6.) All test methods use the same testing machine and specimen dimensions. There is no known means for correlating the results from the different test methods.

NOTE 6—Test Method B for Charpy has been removed and is being revised under a new standard.

4.1.1 In Test Method A, the specimen is held as a vertical cantilever beam and is broken by a single swing of the pendulum. The line of initial contact is at a fixed distance from the specimen clamp and from the centerline of the notch and on the same face as the notch.

4.1.2 Test Method C is similar to Test Method A, except for the addition of a procedure for determining the energy expended in tossing a portion of the specimen. The value reported is called the “estimated net Izod impact resistance.” Test Method C is preferred over Test Method A for materials that have an Izod impact resistance of less than 27 J/m [0.5 ft·lbf/in.] under notch. (See Appendix X4 for optional units.) The differences between Test Methods A and C become unimportant for materials that have an Izod impact resistance higher than this value.

4.1.3 Test Method D provides a measure of the notch sensitivity of a material. The stress-concentration at the notch increases with decreasing notch radius.

4.1.3.1 For a given system, greater stress concentration results in higher localized rates-of-strain. Since the effect of strain-rate on energy-to-break varies among materials, a measure of this effect may be obtained by testing specimens with different notch radii. In the Izod-type test it has been demonstrated that the function, energy-to-break versus notch radius, is reasonably linear from a radius of 0.03 to 2.5 mm [0.001 to 0.100 in.], provided that all specimens have the same type of break. (See 5.8 and 22.1.)

4.1.3.2 For the purpose of this test, the slope, *b* (see 22.1), of the line between radii of 0.25 and 1.0 mm [0.010 and 0.040 in.] is used, unless tests with the 1.0-mm radius give “non-break” results. In that case, 0.25 and 0.50-mm [0.010 and 0.020-in.] radii may be used. The effect of notch radius on the impact energy to break a specimen under the conditions of this test is measured by the value *b*. Materials with low values of *b*, whether high or low energy-to-break with the standard notch,

are relatively insensitive to differences in notch radius; while the energy-to-break materials with high values of *b* is highly dependent on notch radius. The parameter *b* cannot be used in design calculations but may serve as a guide to the designer and in selection of materials.

4.2 Test Method E is similar to Test Method A, except that the specimen is reversed in the vise of the machine 180° to the usual striking position, such that the striker of the apparatus impacts the specimen on the face opposite the notch. (See Fig. 1, Fig. 2.) Test Method E is used to give an indication of the unnotched impact resistance of plastics; however, results obtained by the reversed notch method may not always agree with those obtained on a completely unnotched specimen. (See 28.1.)^{4,5}

5. Significance and Use

5.1 Before proceeding with these test methods, reference should be made to the specification of the material being tested. Any test specimen preparation, conditioning, dimensions, and testing parameters covered in the materials specification shall take precedence over those mentioned in these test methods. If there is no material specification, then the default conditions apply.

5.2 The excess energy pendulum impact test indicates the energy to break standard test specimens of specified size under stipulated parameters of specimen mounting, notching, and pendulum velocity-at-impact.

5.3 The energy lost by the pendulum during the breakage of the specimen is the sum of the following:

- 5.3.1 Energy to initiate fracture of the specimen;
- 5.3.2 Energy to propagate the fracture across the specimen;

⁴ Supporting data giving results of the interlaboratory tests are available from ASTM Headquarters. Request RR: D20-1021.

⁵ Supporting data giving results of the interlaboratory tests are available from ASTM Headquarters. Request RR: D20-1026.

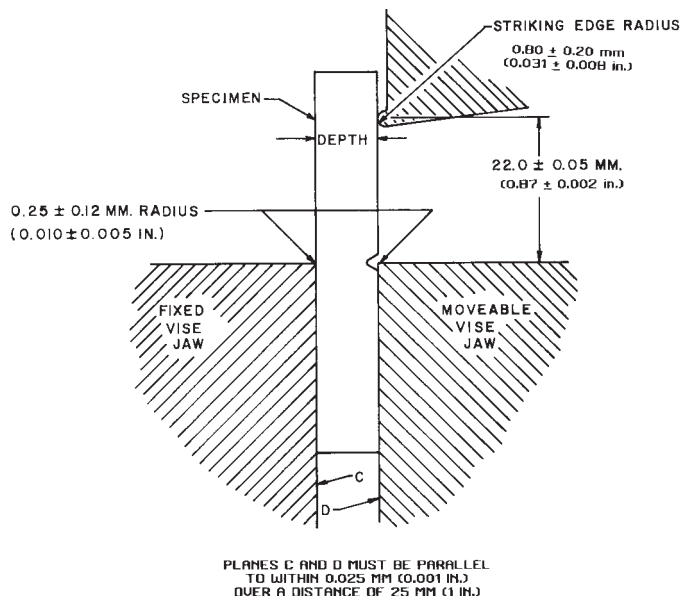


FIG. 1 Relationship of Vise, Specimen, and Striking Edge to Each Other for Izod Test Methods A and C

³ Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036.

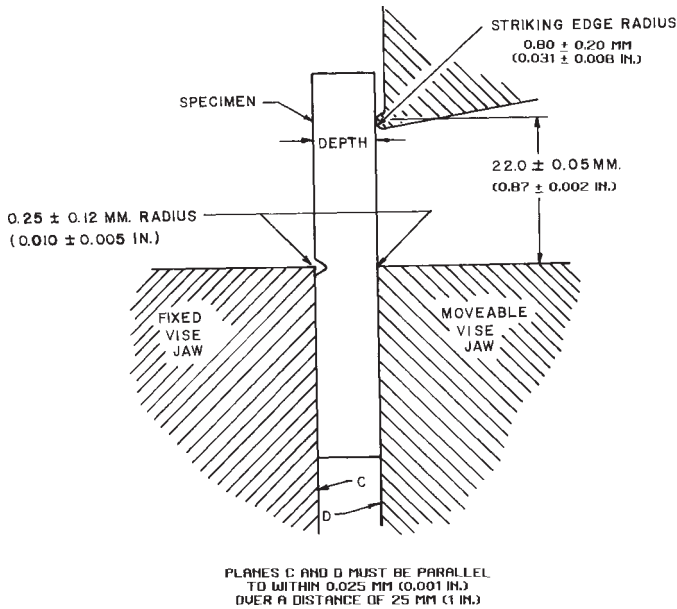


FIG. 2 Relationship of Vise, Specimen, and Striking Edge to Each Other for Test Method E

5.3.3 Energy to throw the free end (or ends) of the broken specimen (“toss correction”);

5.3.4 Energy to bend the specimen;

5.3.5 Energy to produce vibration in the pendulum arm;

5.3.6 Energy to produce vibration or horizontal movement of the machine frame or base;

5.3.7 Energy to overcome friction in the pendulum bearing and in the excess energy indicating mechanism, and to overcome windage (pendulum air drag);

5.3.8 Energy to indent or deform plastically the specimen at the line of impact; and

5.3.9 Energy to overcome the friction caused by the rubbing of the striker (or other part of the pendulum) over the face of the bent specimen.

5.4 For relatively brittle materials, for which fracture propagation energy is small in comparison with the fracture initiation energy, the indicated impact energy absorbed is, for all practical purposes, the sum of factors 5.3.1 and 5.3.3. The toss correction (see 5.3.3) may represent a very large fraction of the total energy absorbed when testing relatively dense and brittle materials. Test Method C shall be used for materials that have an Izod impact resistance of less than 27 J/m [0.5 ft·lbf/in.]. (See Appendix X4 for optional units.) The toss correction obtained in Test Method C is only an approximation of the toss error, since the rotational and rectilinear velocities may not be the same during the re-toss of the specimen as for the original toss, and because stored stresses in the specimen may have been released as kinetic energy during the specimen fracture.

5.5 For tough, ductile, fiber filled, or cloth-laminated materials, the fracture propagation energy (see 5.3.2) may be large compared to the fracture initiation energy (see 5.3.1). When testing these materials, factors (see 5.3.2, 5.3.5, and 5.3.9) can become quite significant, even when the specimen is accurately machined and positioned and the machine is in good condition

with adequate capacity. (See Note 7.) Bending (see 5.3.4) and indentation losses (see 5.3.8) may be appreciable when testing soft materials.

NOTE 7—Although the frame and base of the machine should be sufficiently rigid and massive to handle the energies of tough specimens without motion or excessive vibration, the design must ensure that the center of percussion be at the center of strike. Locating the striker precisely at the center of percussion reduces vibration of the pendulum arm when used with brittle specimens. However, some losses due to pendulum arm vibration, the amount varying with the design of the pendulum, will occur with tough specimens, even when the striker is properly positioned.

5.6 In a well-designed machine of sufficient rigidity and mass, the losses due to factors 5.3.6 and 5.3.7 should be very small. Vibrational losses (see 5.3.6) can be quite large when wide specimens of tough materials are tested in machines of insufficient mass, not securely fastened to a heavy base.

5.7 With some materials, a critical width of specimen may be found below which specimens will appear ductile, as evidenced by considerable drawing or necking down in the region behind the notch and by a relatively high-energy absorption, and above which they will appear brittle as evidenced by little or no drawing down or necking and by a relatively low-energy absorption. Since these methods permit a variation in the width of the specimens, and since the width dictates, for many materials, whether a brittle, low-energy break or a ductile, high energy break will occur, it is necessary that the width be stated in the specification covering that material and that the width be reported along with the impact resistance. In view of the preceding, one should not make comparisons between data from specimens having widths that differ by more than a few mils.

5.8 The type of failure for each specimen shall be recorded as one of the four categories listed as follows:

- C *Complete Break*—A break where the specimen separates into two or more pieces.
- H *Hinge Break*—An incomplete break, such that one part of the specimen cannot support itself above the horizontal when the other part is held vertically (less than 90° included angle).
- P *Partial Break*—An incomplete break that does not meet the definition for a hinge break but has fractured at least 90 % of the distance between the vertex of the notch and the opposite side.
- NB *Non-Break*—An incomplete break where the fracture extends less than 90 % of the distance between the vertex of the notch and the opposite side.

For tough materials, the pendulum may not have the energy necessary to complete the breaking of the extreme fibers and toss the broken piece or pieces. Results obtained from “non-break” specimens shall be considered a departure from standard and shall not be reported as a standard result. Impact resistance cannot be directly compared for any two materials that experience different types of failure as defined in the test method by this code. Averages reported must likewise be derived from specimens contained within a single failure category. This letter code shall suffix the reported impact identifying the types of failure associated with the reported value. If more than one type of failure is observed for a sample material, then the report will indicate the average impact

resistance for each type of failure, followed by the percent of the specimens failing in that manner and suffixed by the letter code.

5.9 The value of the impact methods lies mainly in the areas of quality control and materials specification. If two groups of specimens of supposedly the same material show significantly different energy absorptions, types of breaks, critical widths, or critical temperatures, it may be assumed that they were made of different materials or were exposed to different processing or conditioning environments. The fact that a material shows twice the energy absorption of another under these conditions of test does not indicate that this same relationship will exist under another set of test conditions. The order of toughness may even be reversed under different testing conditions.

NOTE 8—A documented discrepancy exists between manual and digital impact testers, primarily with thermoset materials, including phenolics, having an impact value of less than 54 J/m [1 ft-lb/in.]. Comparing data on the same material, tested on both manual and digital impact testers, may show the data from the digital tester to be significantly lower than data from a manual tester. In such cases a correlation study may be necessary to properly define the true relationship between the instruments.

TEST METHOD A—CANTILEVER BEAM TEST

6. Apparatus

6.1 The machine shall consist of a massive base on which is mounted a vise for holding the specimen and to which is connected, through a rigid frame and bearings, a pendulum-type hammer. (See 6.2.) The machine must also have a pendulum holding and releasing mechanism and a pointer and dial mechanism for indicating the excess energy remaining in the pendulum after breaking the specimen. Optionally, an electronic digital display or computer can be used in place of the dial and pointer to measure the energy loss and indicate the breaking energy of the specimen.

6.2 A jig for positioning the specimen in the vise and graphs or tables to aid in the calculation of the correction for friction and windage also should be included. One type of machine is shown in Fig. 3. One design of specimen-positioning jig is illustrated in Fig. 4. Detailed requirements are given in subsequent paragraphs. General test methods for checking and calibrating the machine are given in Appendix X1. Additional instructions for adjusting a particular machine should be supplied by the manufacturer.

6.3 The pendulum shall consist of a single or multi-membered arm with a bearing on one end and a head, containing the striker, on the other. The arm must be sufficiently rigid to maintain the proper clearances and geometric relationships between the machine parts and the specimen and to minimize vibrational energy losses that are always included in the measured impact resistance. Both simple and compound pendulum designs may comply with this test method.

6.4 The striker of the pendulum shall be hardened steel and shall be a cylindrical surface having a radius of curvature of 0.80 ± 0.20 mm [0.031 ± 0.008 in.] with its axis horizontal and perpendicular to the plane of swing of the pendulum. The line of contact of the striker shall be located at the center of percussion of the pendulum within ± 2.54 mm [± 0.100 in.] (See Note 9.) Those portions of the pendulum adjacent to the

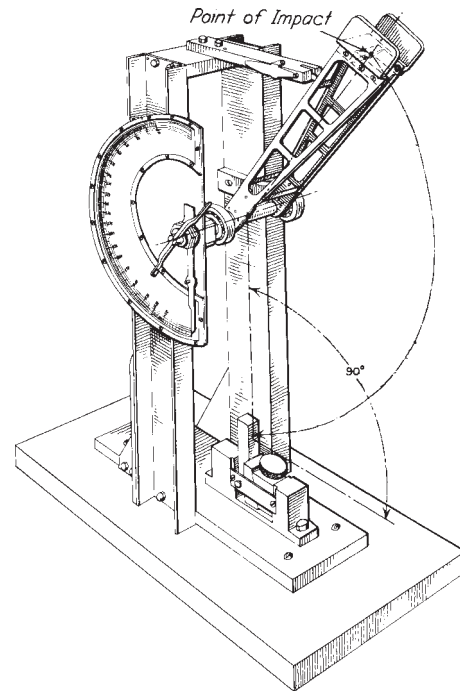


FIG. 3 Cantilever Beam (Izod-Type) Impact Machine



FIG. 4 Jig for Positioning Specimen for Clamping

cylindrical striking edge shall be recessed or inclined at a suitable angle so that there will be no chance for other than this cylindrical surface coming in contact with the specimen during the break.

NOTE 9—The distance from the axis of support to the center of percussion may be determined experimentally from the period of small amplitude oscillations of the pendulum by means of the following equation:

$$L = (g/4\pi^2)p^2$$

where:

- L = distance from the axis of support to the center of percussion, m or [ft],
- g = local gravitational acceleration (known to an accuracy of one part in one thousand), m/s^2 or $[ft/s^2]$,
- π = 3.1416 ($4\pi^2 = 39.48$), and
- p = period, s, of a single complete swing (to and fro) determined by averaging at least 20 consecutive and uninterrupted swings. The angle of swing shall be less than 5° each side of center.

6.5 The position of the pendulum holding and releasing mechanism shall be such that the vertical height of fall of the striker shall be 610 ± 2 mm [24.0 ± 0.1 in.]. This will produce a velocity of the striker at the moment of impact of approximately 3.5 m [11.4 ft]/s. (See Note 10.) The mechanism shall be so constructed and operated that it will release the pendulum without imparting acceleration or vibration to it.

NOTE 10—

$$V = (2gh)^{0.5}$$

where:

- V = velocity of the striker at the moment of impact (m/s),
- g = local gravitational acceleration (m/s^2), and
- h = vertical height of fall of the striker (m).

This assumes no windage or friction.

6.6 The effective length of the pendulum shall be between 0.33 and 0.40 m [12.8 and 16.0 in.] so that the required elevation of the striker may be obtained by raising the pendulum to an angle between 60 and 30° above the horizontal.

6.7 The machine shall be provided with a basic pendulum capable of delivering an energy of 2.7 ± 0.14 J [2.00 ± 0.10 ft-lbf]. This pendulum shall be used with all specimens that extract less than 85 % of this energy. Heavier pendulums shall be provided for specimens that require more energy to break. These may be separate interchangeable pendulums or one basic pendulum to which extra pairs of equal calibrated weights may be rigidly attached to opposite sides of the pendulum. It is imperative that the extra weights shall not significantly change the position of the center of percussion or the free-hanging rest point of the pendulum (that would consequently take the machine outside of the allowable calibration tolerances). A range of pendulums having energies from 2.7 to 21.7 J [2 to 16 ft-lbf] has been found to be sufficient for use with most plastic specimens and may be used with most machines. A series of pendulums such that each has twice the energy of the next will be found convenient. Each pendulum shall have an energy within ± 0.5 % of its nominal capacity.

6.8 A vise shall be provided for clamping the specimen rigidly in position so that the long axis of the specimen is vertical and at right angles to the top plane of the vise. (See Fig. 1.) This top plane shall bisect the angle of the notch with a tolerance of 0.12 mm [0.005 in.]. Correct positioning of the specimen is generally done with a jig furnished with the machine. The top edges of the fixed and moveable jaws shall have a radius of 0.25 ± 0.12 mm [0.010 ± 0.005 in.]. For specimens whose thickness approaches the lower limiting value of 3.00 mm [0.118 in.], means shall be provided to prevent the lower half of the specimen from moving during the clamping or testing operations (see Fig. 4 and Note 11.)

NOTE 11—Some plastics are sensitive to clamping pressure; therefore,

cooperating laboratories should agree upon some means of standardizing the clamping force. One method is using a torque wrench on the screw of the specimen vise. If the faces of the vise or specimen are not flat and parallel, a greater sensitivity to clamping pressure may be evident. See the calibration procedure in Appendix X2 for adjustment and correction instructions for faulty instruments.

6.9 When the pendulum is free hanging, the striking surface shall come within 0.2 % of scale of touching the front face of a standard specimen. During an actual swing this element shall make initial contact with the specimen on a line 22.00 ± 0.05 mm [0.87 ± 0.002 in.] above the top surface of the vise.

6.10 Means shall be provided for determining energy remaining in the pendulum after breaking the specimen. This may consist of a pointer and dial mechanism which indicate the height of rise of the pendulum beyond the point of impact in terms of energy removed from that specific pendulum. Since the indicated remaining energy must be corrected for pendulum-bearing friction, pointer friction, pointer inertia, and pendulum windage, instructions for making these corrections are included in 10.3 and Annex A1 and Annex A2. Optionally, an electronic digital display or computer can be used in place of the dial and pointer to measure the energy loss and indicate the breaking energy of the specimen. If the electronic display does not automatically correct for windage and friction, it shall be incumbent for the operator to determine the energy loss manually. (See Note 12.)

NOTE 12—Many digital indicating systems automatically correct for windage and friction. The equipment manufacturer may be consulted for details concerning how this is performed, or if it is necessary to determine the means for manually calculating the energy loss due to windage and friction.

6.11 The vise, pendulum, and frame shall be sufficiently rigid to maintain correct alignment of the hammer and specimen, both at the moment of impact and during the propagation of the fracture, and to minimize energy losses due to vibration. The base shall be sufficiently massive that the impact will not cause it to move. The machine shall be so designed, constructed, and maintained that energy losses due to pendulum air drag (windage), friction in the pendulum bearings, and friction and inertia in the excess energy-indicating mechanism are held to a minimum.

6.12 A check of the calibration of an impact machine is difficult to make under dynamic conditions. The basic parameters are normally checked under static conditions; if the machine passes the static tests, then it is assumed to be accurate. The calibration procedure in Appendix X2 should be used to establish the accuracy of the equipment. However, for some machine designs it might be necessary to change the recommended method of obtaining the required calibration measurements. Other methods of performing the required checks may be substituted, provided that they can be shown to result in an equivalent accuracy. Appendix X1 also describes a dynamic test for checking certain features of the machine and specimen.

6.13 *Micrometers*—Apparatus for measurement of the width of the specimen shall comply with the requirements of Test Methods D 5947. Apparatus for the measurement of the depth of plastic material remaining in the specimen under the notch shall comply with requirements of Test Methods D 5947,

provided however that the one anvil or presser foot shall be a tapered blade conforming to the dimensions given in Fig. 5. The opposing anvil or presser foot shall be flat and conforming to Test Methods D 5947.

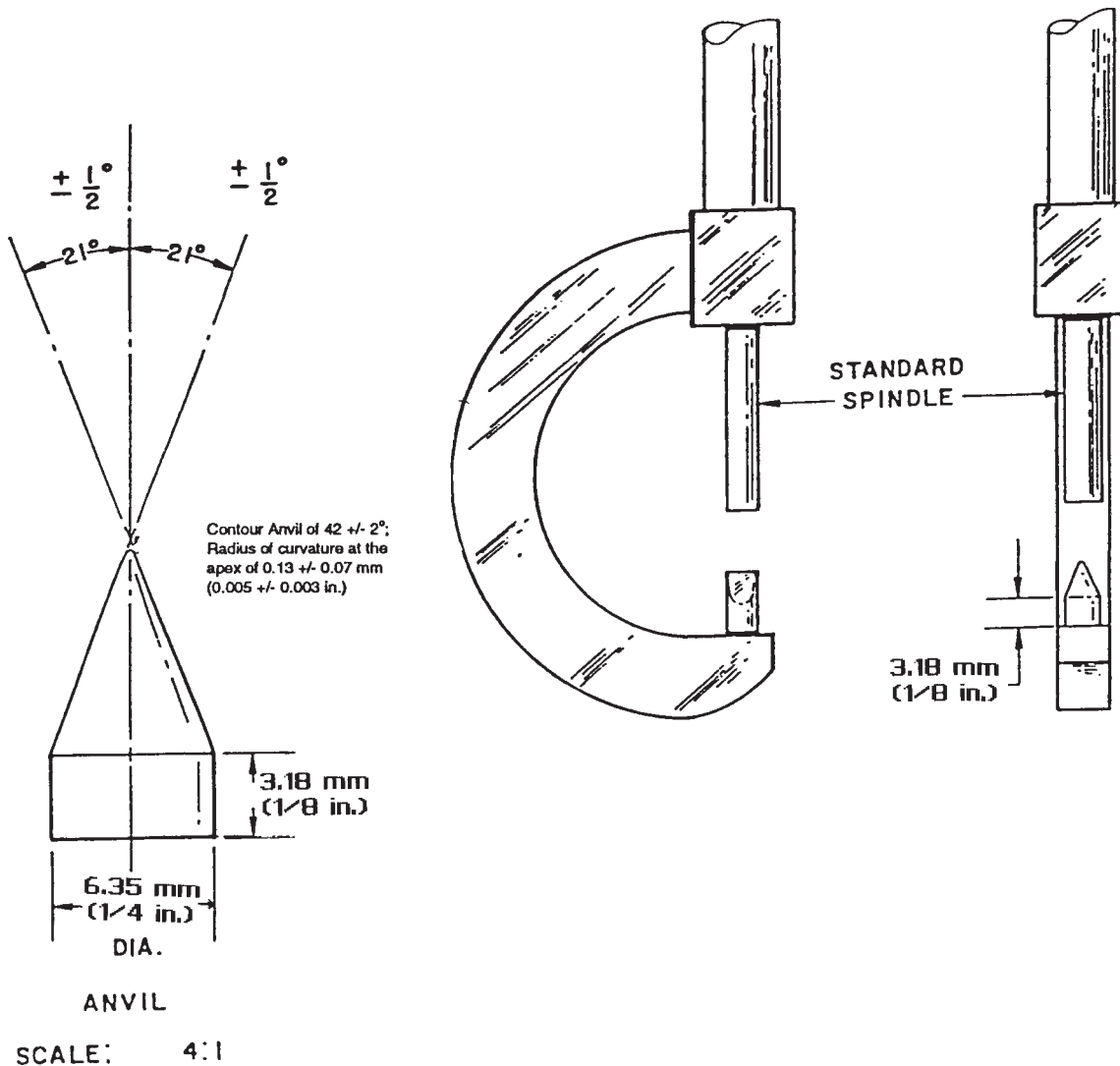
7. Test Specimens

7.1 The test specimens shall conform to the dimensions and geometry of Fig. 6, except as modified in accordance with 7.2, 7.3, 7.4, and 7.5. To ensure the correct contour and conditions of the specified notch, all specimens shall be notched as directed in Section 8.

7.1.1 Studies have shown that, for some materials, the location of the notch on the specimen and the length of the impacted end may have a slight effect on the measured impact resistance. Therefore, unless otherwise specified, care must be taken to ensure that the specimen conforms to the dimensions shown in Fig. 6 and that it is positioned as shown in Fig. 1 or Fig. 2.

7.2 Molded specimens shall have a width between 3.0 and 12.7 mm [0.118 and 0.500 in.]. Use the specimen width as specified in the material specification or as agreed upon between the supplier and the customer. All specimens having

IZOD



- NOTE 1—These views not to scale.
- NOTE 2—Micrometer to be satin-chrome finished with friction thimble.
- NOTE 3—Special anvil for micrometer caliper 0 to 25.4 mm range (50.8 mm frame) [0 to 1 in. range (2-in. frame)].
- NOTE 4—Anvil to be oriented with respect to frame as shown.
- NOTE 5—Anvil and spindle to have hardened surfaces.
- NOTE 6—Range: 0 to 25.4 mm [0 to 1 in. in thousandths of an inch].
- NOTE 7—Adjustment must be at zero when spindle and anvil are in contact.

FIG. 5 Early (ca. 1970) Version of a Notch-Depth Micrometer

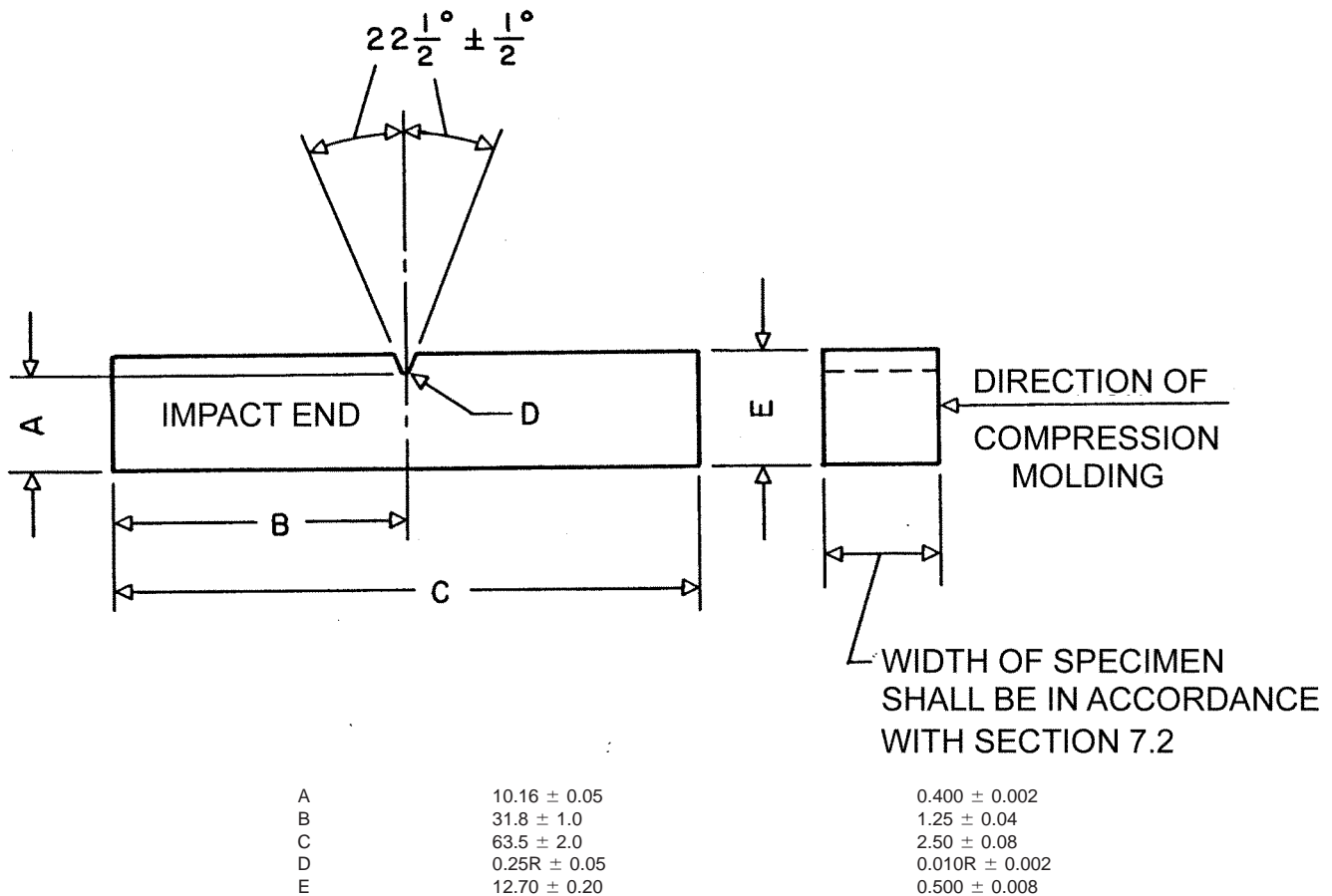


FIG. 6 Dimensions of Izod-Type Test Specimen

one dimension less than 12.7 mm [0.500 in.] shall have the notch cut on the shorter side. Otherwise, all compression-molded specimens shall be notched on the side parallel to the direction of application of molding pressure. (Due to the draft of the mold, the notched surface and the opposite surface may not be parallel in molded specimens. Therefore, it is essential that the notched surface be machined parallel to its opposite surface within 0.025 mm [0.001 in.], removing a minimum of material in the process, so as to remain within the allowable tolerance for the specimen depth). (See Fig. 6.)

7.2.1 Extreme care must be used in handling specimens less than 6.35 mm [0.250 in.] wide. Such specimens must be accurately positioned and supported to prevent twist or lateral buckling during the test. Some materials, furthermore, are very sensitive to clamping pressure (see Note 11).

7.2.2 A critical investigation of the mechanics of impact testing has shown that tests made upon specimens under 6.35 mm [0.250 in.] wide absorb more energy due to crushing, bending, and twisting than do wider specimens. Therefore, specimens 6.35 mm [0.250 in.] or over in width are recommended. The responsibility for determining the minimum specimen width shall be the investigator's, with due reference to the specification for that material.

7.2.3 Material specification should be consulted for preferred molding conditions. The type of mold and molding machine used and the flow behavior in the mold cavity will

influence the impact resistance obtained. A specimen taken from one end of a molded plaque may give different results than a specimen taken from the other end. Cooperating laboratories should therefore agree on standard molds conforming to the material specification. Practice D 3641 can be used as a guide for general molding tolerances, but refer to the material specification for specific molding conditions.

7.2.4 The impact resistance of a plastic material may be different if the notch is perpendicular to, rather than parallel to, the direction of molding. The same is true for specimens cut with or across the grain of an anisotropic sheet or plate.

7.3 For sheet materials, the specimens shall be cut from the sheet in both the lengthwise and crosswise directions unless otherwise specified. The width of the specimen shall be the thickness of the sheet if the sheet thickness is between 3.0 and 12.7 mm [0.118 and 0.500 in.]. Sheet material thicker than 12.7 mm shall be machined down to 12.7 mm. Specimens with a 12.7-mm square cross section may be tested either edgewise or flatwise as cut from the sheet. When specimens are tested flatwise, the notch shall be made on the machined surface if the specimen is machined on one face only. When the specimen is cut from a thick sheet, notation shall be made of the portion of the thickness of the sheet from which the specimen was cut, for example, center, top, or bottom surface.

7.4 The practice of cementing, bolting, clamping, or otherwise combining specimens of substandard width to form a

composite test specimen is not recommended and should be avoided since test results may be seriously affected by interface effects or effects of solvents and cements on energy absorption of composite test specimens, or both. However, if Izod test data on such thin materials are required when no other means of preparing specimens are available, and if possible sources of error are recognized and acceptable, the following technique of preparing composites may be utilized.

7.4.1 The test specimen shall be a composite of individual thin specimens totaling 6.35 to 12.7 mm [0.250 to 0.500 in.] in width. Individual members of the composite shall be accurately aligned with each other and clamped, bolted, or cemented together. The composite shall be machined to proper dimensions and then notched. In all such cases the use of composite specimens shall be noted in the report of test results.

7.4.2 Care must be taken to select a solvent or adhesive that will not affect the impact resistance of the material under test. If solvents or solvent-containing adhesives are employed, a conditioning procedure shall be established to ensure complete removal of the solvent prior to test.

7.5 Each specimen shall be free of twist (see Note 13) and shall have mutually perpendicular pairs of plane parallel surfaces and free from scratches, pits, and sink marks. The specimens shall be checked for compliance with these requirements by visual observation against straightedges, squares, and flat plates, and by measuring with micrometer calipers. Any specimen showing observable or measurable departure from one or more of these requirements shall be rejected or machined to the proper size and shape before testing.

NOTE 13—A specimen that has a slight twist to its notched face of 0.05 mm [0.002 in.] at the point of contact with the pendulum striking edge will be likely to have a characteristic fracture surface with considerable greater fracture area than for a normal break. In this case the energy to break and toss the broken section may be considerably larger (20 to 30 %) than for a normal break. A tapered specimen may require more energy to bend it in the vise before fracture.

8. Notching Test Specimens

8.1 Notching shall be done on a milling machine, engine lathe, or other suitable machine tool. Both the feed speed and the cutter speed shall be constant throughout the notching operation (see Note 14). Provision for cooling the specimen with either a liquid or gas coolant is recommended. A single-tooth cutter shall be used for notching the specimen, unless notches of an equivalent quality can be produced with a multi-tooth cutter. Single-tooth cutters are preferred because of the ease of grinding the cutter to the specimen contour and because of the smoother cut on the specimen. The cutting edge shall be carefully ground and honed to ensure sharpness and freedom from nicks and burrs. Tools with no rake and a work relief angle of 15 to 20° have been found satisfactory.

NOTE 14—For some thermoplastics, cutter speeds from 53 to 150 m/min [175 to 490 ft/min] at a feed speed of 89 to 160 mm/min [3.5 to 6.3 in./min] without a water coolant or the same cutter speeds at a feed speed of from 36 to 160 mm/min [1.4 to 6.3 in./min] with water coolant produced suitable notches.

8.2 Specimens may be notched separately or in a group. However, in either case an unnotched backup or “dummy bar” shall be placed behind the last specimen in the sample holder

to prevent distortion and chipping by the cutter as it exits from the last test specimen.

8.3 The profile of the cutting tooth or teeth shall be such as to produce a notch of the contour and depth in the test specimen as specified in Fig. 6 (see Note 15). The included angle of the notch shall be $45 \pm 1^\circ$ with a radius of curvature at the apex of 0.25 ± 0.05 mm [0.010 ± 0.002 in.]. The plane bisecting the notch angle shall be perpendicular to the face of the test specimen within 2° .

NOTE 15—There is evidence that notches in materials of widely varying physical dimensions may differ in contour even when using the same cutter. If the notch in the specimen should take the contour of the cutter, then the contour of the tip of the cutter may be checked instead of the notch in the specimen for single-tooth cutters. Under the same condition, multi-tooth cutters may be checked by measuring the contour of a strip of soft metal shim inserted between two specimens for notching.

8.4 The depth of the plastic material remaining in the specimen under the notch shall be 10.16 ± 0.05 mm [0.400 ± 0.002 in.]. This dimension shall be measured with apparatus in accordance with 6.13. The tapered blade will be fitted to the notch. The specimen will be approximately vertical between the anvils. For specimens with a draft angle, position edge of the non-cavity (wider edge) surface centered on the micrometer’s flat circular anvil.

8.5 Cutter speed and feed speed should be chosen appropriate for the material being tested since the quality of the notch may be adversely affected by thermal deformations and stresses induced during the cutting operation if proper conditions are not selected.⁶ The notching parameters used shall not alter the physical state of the material such as by raising the temperature of a thermoplastic above its glass transition temperature. In general, high cutter speeds, slow feed rates, and lack of coolant induce more thermal damage than a slow cutter speed, fast feed speed, and the use of a coolant. Too high a feed speed/cutter speed ratio, however, may cause impacting and cracking of the specimen. The range of cutter speed/feed ratios possible to produce acceptable notches can be extended by the use of a suitable coolant. (See Note 16.) In the case of new types of plastics, it is necessary to study the effect of variations in the notching conditions. (See Note 17.)

NOTE 16—Water or compressed gas is a suitable coolant for many plastics.

NOTE 17—Embedded thermocouples, or another temperature measuring device, can be used to determine the temperature rise in the material near the apex of the notch during machining. Thermal stresses induced during the notching operation can be observed in transparent materials by viewing the specimen at low magnification between crossed polars in monochromatic light.

8.6 The specimen notch produced by each cutter will be examined, at a minimum, after every 500 notches. The notch in the specimen, made of the material to be tested, shall be inspected and verified. One procedure for the inspection and verification of the notch is presented in Appendix X1. Each type of material being notched must be inspected and verified at that time. If the angle or radius does not fall within the

⁶ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR: D20-1066.

specified limits for materials of satisfactory machining characteristics, then the cutter shall be replaced with a newly sharpened and honed one. (See Note 18.)

NOTE 18—A carbide-tipped or industrial diamond-tipped notching cutter is recommended for longer service life.

9. Conditioning

9.1 *Conditioning*—Condition the test specimens at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ [$73 \pm 3.6^\circ\text{F}$] and $50 \pm 5\%$ relative humidity for not less than 40 h after notching and prior to testing in accordance with Procedure A of Practice D 618, unless it can be documented (between supplier and customer) that a shorter conditioning time is sufficient for a given material to reach equilibrium of impact resistance.

9.1.1 Note that for some hygroscopic materials, such as nylons, the material specifications (for example, Specification D 4066) call for testing “dry as-molded specimens.” Such requirements take precedence over the above routine preconditioning to 50 % relative humidity and require sealing the specimens in water vapor-impermeable containers as soon as molded and not removing them until ready for testing.

9.2 *Test Conditions*—Conduct tests in the standard laboratory atmosphere of $23 \pm 2^\circ\text{C}$ [$73 \pm 3.6^\circ\text{F}$] and $50 \pm 5\%$ relative humidity, unless otherwise specified in the material specification or by customer requirements. In cases of disagreement, the tolerances shall be $\pm 1^\circ\text{C}$ [$\pm 1.8^\circ\text{F}$] and $\pm 2\%$ relative humidity.

10. Procedure

10.1 At least five and preferably ten or more individual determinations of impact resistance must be made on each sample to be tested under the conditions prescribed in Section 9. Each group shall consist of specimens with the same nominal width ($\pm 0.13\text{ mm}$ [$\pm 0.005\text{ in.}$]). In the case of specimens cut from sheets that are suspected of being anisotropic, prepare and test specimens from each principal direction (lengthwise and crosswise to the direction of anisotropy).

10.2 Estimate the breaking energy for the specimen and select a pendulum of suitable energy. Use the lightest standard pendulum that is expected to break each specimen in the group with a loss of not more than 85 % of its energy (see Note 19). Check the machine with the proper pendulum in place for conformity with the requirements of Section 6 before starting the tests. (See Appendix X1.)

NOTE 19—Ideally, an impact test would be conducted at a constant test velocity. In a pendulum-type test, the velocity decreases as the fracture progresses. For specimens that have an impact energy approaching the capacity of the pendulum there is insufficient energy to complete the break and toss. By avoiding the higher 15 % scale energy readings, the velocity of the pendulum will not be reduced below 1.3 m/s [4.4 ft/s]. On the other hand, the use of too heavy a pendulum would reduce the sensitivity of the reading.

10.3 If the machine is equipped with a mechanical pointer and dial, perform the following operations before testing the specimens:

10.3.1 With the excess energy indicating pointer in its normal starting position but without a specimen in the vise,

release the pendulum from its normal starting position and note the position the pointer attains after the swing as one reading of Factor *A*.

10.3.2 Without resetting the pointer, raise the pendulum and release again. The pointer should move up the scale an additional amount. Repeat (10.3.2) until a swing causes no additional movement of the pointer and note the final reading as one reading of Factor *B* (see Note 20).

10.3.3 Repeat the preceding two operations several times and calculate and record the average *A* and *B* readings.

NOTE 20—Factor *B* is an indication of the energy lost by the pendulum to friction in the pendulum bearings and to windage. The difference *A* – *B* is an indication of the energy lost to friction and inertia in the excess energy indicating mechanism. However, the actual corrections will be smaller than these factors, since in an actual test the energy absorbed by the specimen prevents the pendulum from making a full swing. Therefore, the indicated breaking energy of the specimen must be included in the calculation of the machine correction before determining the breaking energy of the specimen (see 10.8). The *A* and *B* values also provide an indication of the condition of the machine.

10.3.4 If excessive friction is indicated, the machine shall be adjusted before starting a test. If the machine is equipped with a digital energy indicating system, follow the manufacturer’s instructions to correct for windage and friction. If excessive friction is indicated, the machine shall be adjusted before starting a test.

10.4 Check the specimens for conformity with the requirements of Sections 7, 8, and 10.1.

10.5 Measure and record the width of each specimen after notching to the nearest 0.025 mm [0.001 in.]. Measure the width in one location adjacent to the notch centered about the anticipated fracture plane.

10.6 Measure and record the depth of material remaining in the specimen under the notch of each specimen to the nearest 0.025 mm [0.001 in.]. The tapered blade will be fitted to the notch. The specimen will be approximately vertical between the anvils. For specimens with a draft angle, position edge of the non-cavity (wider edge) surface centered on the micrometer’s flat circular anvil.

10.7 Position the specimen precisely (see 6.7) so that it is rigidly, but not too tightly (see Note 11), clamped in the vise. Pay special attention to ensure that the “impacted end” of the specimen as shown and dimensioned in Fig. 6 is the end projecting above the vise. Release the pendulum and record the excess energy remaining in the pendulum after breaking the specimen, together with a description of the appearance of the broken specimen (see failure categories in 5.8).

10.8 Subtract the windage and friction correction from the indicated breaking energy of the specimen, unless determined automatically by the indicating system (that is, digital display or computer). If a mechanical dial and pointer is employed, use the *A* and *B* factors and the appropriate tables or the graph described in Annex A1 and Annex A2 to determine the correction. For those digital systems that do not automatically compensate for windage and friction, follow the manufacturer’s procedure for performing this correction.

10.8.1 In other words, either manually or automatically, the windage and friction correction value is subtracted from the uncorrected, indicated breaking energy to obtain the new

breaking energy. Compare the net value so found with the energy requirement of the hammer specified in 10.2. If a hammer of improper energy was used, discard the result and make additional tests on new specimens with the proper hammer. (See Annex A1 and Annex A2.)

10.9 Divide the net value found in 10.8 by the measured width of the particular specimen to obtain the impact resistance under the notch in J/m [ft·lbf/in.]. If the optional units of kJ/m²[ft·lbf/in.²] are used, divide the net value found in 10.8 by the measured width and depth under the notch of the particular specimen to obtain the impact strength. The term, “depth under the notch,” is graphically represented by Dimension A in Fig. 6. Consequently, the cross-sectional area (width times depth under the notch) will need to be reported. (See Appendix X4.)

10.10 Calculate the average Izod impact resistance of the group of specimens. However, only values of specimens having the same nominal width and type of break may be averaged. Values obtained from specimens that did not break in the manner specified in 5.8 shall not be included in the average. Also calculate the standard deviation of the group of values.

11. Report

11.1 Report the following information:

11.1.1 The test method used (Test Method A, C, D, or E),

11.1.2 Complete identification of the material tested, including type source, manufacturer’s code number, and previous history,

11.1.3 A statement of how the specimens were prepared, the testing conditions used, the number of hours the specimens were conditioned after notching, and, for sheet materials, the direction of testing with respect to anisotropy, if any,

11.1.4 The capacity of the pendulum in joules, or foot pound-force, or inch pound-force,

11.1.5 The width and depth under the notch of each specimen tested,

11.1.6 The total number of specimens tested per sample of material,

11.1.7 The type of failure (see 5.8),

11.1.8 The impact resistance must be reported in J/m [ft·lbf/in.]; the optional units of kJ/m² [ft·lbf/in.²] may also be required (see 10.9),

11.1.9 The number of those specimens that resulted in failures which conforms to each of the requirement categories in 5.8,

11.1.10 The average impact resistance and standard deviation (in J/m [ft·lbf/in.]) for those specimens in each failure category, except non-break as presented in 5.8. Optional units (kJ/m²[ft·lbf/in.²]) may also need to be reported (see Appendix X4), and

11.1.11 The percent of specimens failing in each category suffixed by the corresponding letter code from 5.8.

TEST METHOD C—CANTILEVER BEAM TEST FOR MATERIALS OF LESS THAN 27 J/m [0.5 ft·lbf/in.]

12. Apparatus

12.1 The apparatus shall be the same as specified in Section 6.

13. Test Specimens

13.1 The test specimens shall be the same as specified in Section 7.

14. Notching Test Specimens

14.1 Notching test specimens shall be the same as specified in Section 8.

15. Conditioning

15.1 Specimen conditioning and test environment shall be in accordance with Section 9.

16. Procedure

16.1 The procedure shall be the same as in Section 10 with the addition of a procedure for estimating the energy to toss the broken specimen part.

16.1.1 Make an estimate of the magnitude of the energy to toss each different type of material and each different specimen size (width). This is done by repositioning the free end of the broken specimen on the clamped portion and striking it a second time with the pendulum released in such a way as to impart to the specimen approximately the same velocity it had attained during the test. This is done by releasing the pendulum from a height corresponding to that to which it rose following the breakage of the test specimen. The energy to toss is then considered to be the difference between the reading previously described and the free swing reading obtained from this height. A reproducible method of starting the pendulum from the proper height must be devised.

17. Report

17.1 Report the following information:

17.1.1 Same as 11.1.1,

17.1.2 Same as 11.1.2,

17.1.3 Same as 11.1.3,

17.1.4 Same as 11.1.4,

17.1.5 Same as 11.1.5,

17.1.6 Same as 11.1.6,

17.1.7 The average reversed notch impact resistance, J/m [ft·lbf/in.] (see 5.8 for failure categories),

17.1.8 Same as 11.1.8,

17.1.9 Same as 11.1.9,

17.1.10 Same as 11.1.10, and

17.1.11 Same as 11.1.11.

17.1.12 The estimated toss correction, expressed in terms of joule (J) or foot pound-force (ft·lbf).

17.1.13 The difference between the Izod impact energy and the toss correction energy is the net Izod energy. This value is divided by the specimen width (at the base of notch) to obtain the net Izod impact resistance for the report.

TEST METHOD D—NOTCH RADIUS SENSITIVITY TEST

18. Apparatus

18.1 The apparatus shall be the same as specified in Section 6.

19. Test Specimens

19.1 The test specimens shall be the same as specified in Section 7. All specimens must be of the same nominal width, preferably 6.35-mm [0.25-in.].

20. Notching Test Specimens

20.1 Notching shall be done as specified in Section 8 and Fig. 6, except those ten specimens shall be notched with a radius of 0.25 mm [0.010 in.] and ten specimens with a radius of 1.0 mm [0.040 in.].

21. Conditioning

21.1 Specimen conditioning and test environment shall be in accordance with Section 9.

22. Procedure

22.1 Proceed in accordance with Section 10, testing ten specimens of each notch radius.

22.2 The average impact resistance of each group shall be calculated, except that within each group the type of break must be homogeneously C, H, C and H, or P.

22.3 If the specimens with the 0.25-mm [0.010-in.] radius notch do not break, the test is not applicable.

22.4 If any of ten specimens tested with the 1.0-mm [0.040-in.] radius notch fail as in category NB, non-break, the notch sensitivity procedure cannot be used without obtaining additional data. A new set of specimens should be prepared from the same sample, using a 0.50-mm [0.020-in.] notch radius and the procedure of 22.1 and 22.2 repeated.

23. Calculation

23.1 Calculate the slope of the line connecting the values for impact resistance for 0.25 and 1.0-mm notch radii or [0.010 and 0.040-in. notch radii] by the equation presented as follows. (If a 0.500-mm [0.020-in.] notch radius is substituted, adjust the calculation accordingly.)

$$b = (E_2 - E_1)/(R_2 - R_1)$$

where:

E_2 = average impact resistance for the larger notch, J/m of notch,

E_1 = average impact resistance for the smaller notch, J/m of notch,

R_2 = radius of the larger notch, mm, and

R_1 = radius of the smaller notch, mm.

Example:

$$E_{1.0} = 330.95 \text{ J/m}; E_{0.25} = 138.78 \text{ J/m}$$

$$b = (330.95 - 138.78 \text{ J/m}) / (1.00 - 0.25 \text{ mm})$$

$$b = 192.17 \text{ J/m } 0.75 \text{ mm}$$

$$= 256.23 \text{ J/m}$$

of notch per mm of radius

24. Report

24.1 Report the following information:

24.1.1 Same as 11.1.1,

24.1.2 Same as 11.1.2,

24.1.3 Same as 11.1.3,

24.1.4 Same as 11.1.4,

24.1.5 Same as 11.1.5,

24.1.6 Same as 11.1.6,

24.1.7 The average reversed notch impact resistance, in J/m [ft·lbf/in.] (see 5.8 for failure categories),

24.1.8 Same as 11.1.8,

24.1.9 Same as 11.1.9,

24.1.10 Same as 11.1.10, and

24.1.11 Same as 11.1.11.

24.1.12 Report the average value of b with its units, and the average Izod impact resistance for a 0.25-mm [0.010-in.] notch.

TEST METHOD E—CANTILEVER BEAM REVERSED NOTCH TEST

25. Apparatus

25.1 The apparatus shall be the same as specified in Section 6.

26. Test Specimens

26.1 The test specimen shall be the same as specified in Section 7.

27. Notching Test Specimens

27.1 Notch the test specimens in accordance with Section 8.

28. Conditioning

28.1 Specimen conditioning and test environment shall be in accordance with Section 9.

29. Procedure

29.1 Proceed in accordance with Section 10, except clamp the specimen so that the striker impacts it on the face opposite the notch, hence subjecting the notch to compressive rather than tensile stresses during impact (see Fig. 2 and Note 21, Note 22, and Note 23).

NOTE 21—The reversed notch test employs a standard 0.25-mm [0.010-in.] notch specimen to provide an indication of unnotched impact resistance. Use of the reversed notch test obviates the need for machining unnotched specimens to the required 10.2 ± 0.05 -mm [0.400 ± 0.002 -in.] depth before testing and provides the same convenience of specimen mounting as the standard notch tests (Test Methods A and C).

NOTE 22—Results obtained by the reversed notch test may not always agree with those obtained on unnotched bars that have been machined to the 10.2-mm [0.400-in.] depth requirement. For some materials, the effects arising from the difference in the clamped masses of the two specimen types during test, and those attributable to a possible difference in toss energies ascribed to the broken ends of the respective specimens, may contribute significantly to a disparity in test results.

NOTE 23—Where materials are suspected of anisotropy, due to molding or other fabricating influences, notch reversed notch specimens on the face opposite to that used for the standard Izod test; that is, present the same face to the impact blow.

30. Report

30.1 Report the following information:

30.1.1 Same as 11.1.1,

30.1.2 Same as 11.1.2,

30.1.3 Same as 11.1.3,

30.1.4 Same as 11.1.4,

- 30.1.5 Same as 11.1.5,
- 30.1.6 Same as 11.1.6,
- 30.1.7 The average reversed notch impact resistance, J/m [ft-lbf/in.] (see 5.8 for failure categories),
- 30.1.8 Same as 11.1.8,
- 30.1.9 Same as 11.1.9,
- 30.1.10 Same as 11.1.10, and
- 30.1.11 Same as 11.1.11.

31. Precision and Bias

31.1 Table 1 and Table 2 are based on a round robin⁷ in accordance with Practice E 691. For each material, all the test bars were prepared at one source, except for notching. Each participating laboratory notched the bars that they tested. Table 1 and Table 2 are presented on the basis of a test result being the average for five specimens. In the round robin each laboratory tested, on average, nine specimens of each material.

31.2 Table 3 is based on a round robin⁵ involving five materials tested by seven laboratories. For each material, all the samples were prepared at one source, and the individual specimens were all notched at the same laboratory. Table 3 is presented on the basis of a test result being the average for five specimens. In the round robin, each laboratory tested ten specimens of each material.

31.3 *Concept of I_r and I_R* —**Warning**—The following explanations of I_r and I_R (see 31.3-31.3.3) are only intended to present a meaningful way of considering the precision of this test method. The data in Tables 1-3 should not be rigorously applied to acceptance or rejection of material, as those data are

specific to the round robin and may not be representative of other lots, conditions, materials, or laboratories. Users of this test method should apply the principles outlined in Practice E 691 to generate data specific to their laboratory and materials, or between specific laboratories. The principles of 31.3-31.3.3 would then be valid for such data.

If S_r and S_R have been calculated from a large enough body of data, and for test results that were averages from testing five specimens.

31.3.1 *Repeatability, I_r (Comparing Two Test Results for the Same Material, Obtained by the Same Operator Using the Same Equipment on the Same Day)*—The two test results should be judged not equivalent if they differ by more than the I_r value for that material.

31.3.2 *Reproducibility, I_R (Comparing Two Test Results for the Same Material, Obtained by Different Operators Using Different Equipment on Different Days)*—The two test results should be judged not equivalent if they differ by more than the I_R value for that material.

31.3.3 Any judgment in accordance with 31.3.1 and 31.3.2 would have an approximate 95 % (0.95) probability of being correct.

31.4 *Bias*—There is no recognized standards by which to estimate bias of these test methods.

NOTE 24—Numerous changes have occurred since the collection of the original round-robin data in 1973.⁷ Consequently, a new task group has been formed to evaluate a precision and bias statement for the latest revision of these test methods.

32. Keywords

32.1 impact resistance; Izod impact; notch sensitivity; notched specimen; reverse notch impact

⁷ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR: D20-1034.

TABLE 1 Precision Data, Test Method A—Reversed Notch Izod

NOTE 1—Values in ft-lbf/in. of width [J/m of width].

NOTE 2—See Footnote 10.

Material	Average	S_r^A	S_R^B	I_r^C	I_R^D	Number of Laboratories
Phenolic	0.57 [30.4]	0.024 [1.3]	0.076 [4.1]	0.06 [3.2]	0.21 [11.2]	19
Acetal	1.45 [77.4]	0.075 [4.0]	0.604 [32.3]	0.21 [11.2]	1.70 [90.8]	9
Reinforced nylon	1.98 [105.7]	0.083 [4.4]	0.245 [13.1]	0.23 [12.3]	0.69 [36.8]	15
Polypropylene	2.66 [142.0]	0.154 [8.2]	0.573 [30.6]	0.43 [23.0]	1.62 [86.5]	24
ABS	10.80 [576.7]	0.136 [7.3]	0.585 [31.2]	0.38 [20.3]	1.65 [88.1]	25
Polycarbonate	16.40 [875.8]	0.295 [15.8]	1.056 [56.4]	0.83 [44.3]	2.98 [159.1]	25

^A S_r = within-laboratory standard deviation of the average.

^B S_R = between-laboratories standard deviation of the average.

^C $I_r = 2.83 S_r$

^D $I_R = 2.83 S_R$.

TABLE 2 Precision Data, Test Method C—Reversed Notch Izod

NOTE 1—Values in ft-lbf/in. of width [J/m of width].
 NOTE 2—See Footnote 10.

Material	Average	S_r^A	S_R^B	I_r^C	I_R^D	Number of Laboratories
Phenolic	0.45 [24.0]	0.038 [2.0]	0.129 [6.9]	0.10 [5.3]	0.36 [19.2]	15

^A S_r = within-laboratory standard deviation of the average.
^B S_R = between-laboratories standard deviation of the average.
^C $I_r = 2.83 S_r$
^D $I_R = 2.83 S_R$

TABLE 3 Precision Data, Test Method E—Reversed Notch Izod

NOTE 1—Values in ft-lbf/in. of width [J/m of width].
 NOTE 2—See Footnote 8.

Material	Average	S_r^A	S_R^B	I_r^C	I_R^D
Acrylic sheet, unmodified	3.02 [161.3]	0.243 [13.0]	0.525 [28.0]	0.68 [36.3]	0.71 [37.9]
Premix molding compounds laminate acrylic, injection molded	6.11 [326.3]	0.767 [41.0]	0.786 [42.0]	2.17 [115.9]	2.22 [118.5]
compound (SMC) laminate	10.33 [551.6]	0.878 [46.9]	1.276 [68.1]	2.49 [133.0]	3.61 [192.8]
Preformed mat laminate	11.00 [587.4]	0.719 [38.4]	0.785 [41.9]	2.03 [108.4]	2.22 [118.5]
	19.43 [1037.6]	0.960 [51.3]	1.618 [86.4]	2.72 [145.2]	4.58 [244.6]

^A S_r = within-laboratory standard deviation of the average.
^B S_R = between-laboratories standard deviation of the average.
^C $I_r = 2.83 S_r$
^D $I_R = 2.83 S_R$

ANNEXES

(Mandatory Information)

A1. INSTRUCTIONS FOR THE CONSTRUCTION OF A WINDAGE AND FRICTION CORRECTION CHART

A1.1 The construction and use of the chart herein described is based upon the assumption that the friction and windage losses are proportional to the angle through which these loss torques are applied to the pendulum. Fig. A1.1 shows the assumed energy loss versus the angle of the pendulum position during the pendulum swing. The correction chart to be described is principally the left half of Fig. A1.1. The windage and friction correction charts should be available from commercial testing machine manufacturers. The energy losses designated as A and B are described in 10.3.

A1.2 Start the construction of the correction chart (see Fig. A1.2) by laying off to some convenient linear scale on the abscissa of a graph the angle of pendulum position for the

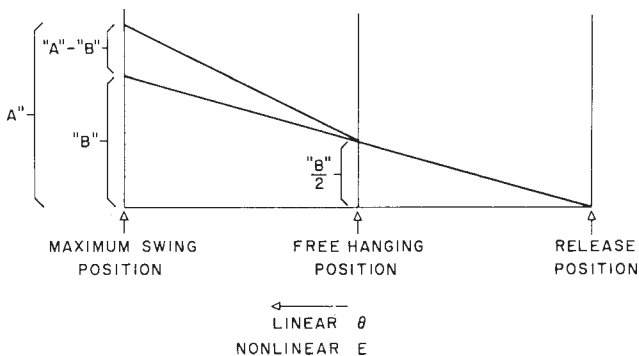


FIG. A1.1 Method of Construction of a Windage and Friction Correction Chart

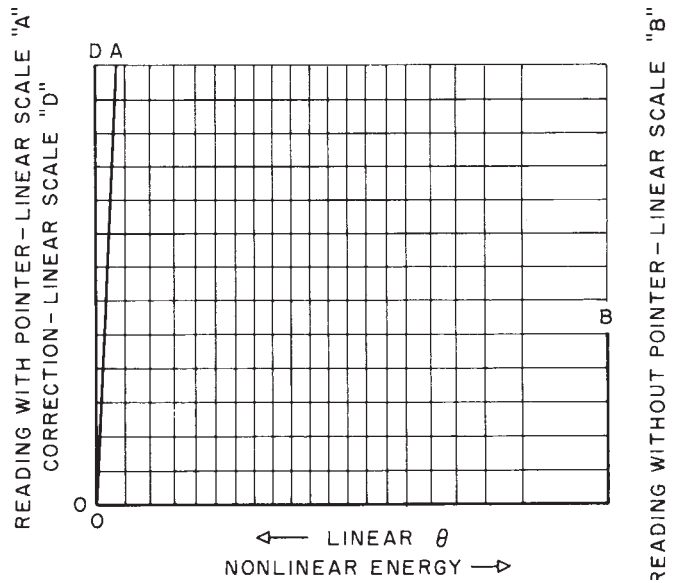


FIG. A1.2 Sample Windage and Friction Correction Chart

portion of the swing beyond the free hanging position. For convenience, place the free hanging reference point on the right end of the abscissa with the angular displacement increasing linearly to the left. The abscissa is referred to as Scale C. Although angular displacement is the quantity to be represented linearly on the abscissa, this displacement is more conveniently expressed in terms of indicated energy read from

the machine dial. This yields a nonlinear Scale C with indicated pendulum energy increasing to the right.

A1.3 On the right-hand ordinate lay off a linear Scale B starting with zero at the bottom and stopping at the maximum expected pendulum friction and windage value at the top.

A1.4 On the left ordinate construct a linear Scale D ranging from zero at the bottom to 1.2 times the maximum ordinate value appearing on Scale B, but make the scale twice the scale used in the construction of Scale B.

A1.5 Adjoining Scale D draw a curve OA that is the focus of points whose coordinates have equal values of energy correction on Scale D and indicated energy on Scale C. This curve is referred to as Scale A and utilizes the same divisions and numbering system as the adjoining Scale D.

A1.6 Instructions for Using Chart:

A1.6.1 Locate and mark on Scale A the reading A obtained from the free swing of the pendulum with the pointer prepositioned in the free hanging or maximum indicated energy position on the dial.

A1.6.2 Locate and mark on Scale B the reading B obtained after several free swings with the pointer pushed up close to the zero indicated energy position of the dial by the pendulum in accordance with instructions in 10.3.

A1.6.3 Connect the two points thus obtained by a straight line.

A1.6.4 From the indicated impact energy on Scale C project up to the constructed line and across to the left to obtain the correction for windage and friction from Scale D.

A1.6.5 Subtract this correction from the indicated impact reading to obtain the energy delivered to the specimen.

A2. PROCEDURE FOR THE CALCULATION OF WINDAGE AND FRICTION CORRECTION

A2.1 The procedure for the calculation of the windage and friction correction in this annex is based on the equations developed by derivation in Appendix X3. This procedure can be used as a substitute for the graphical procedure described in Annex A1 and is applicable to small electronic calculator and computer analysis.

A2.2 Calculate L , the distance from the axis of support to the center of percussion as indicated in 6.3. (It is assumed here that the center of percussion is approximately the same as the center of gravity.)

A2.3 Measure the maximum height, h_M , of the center of percussion (center of gravity) of the pendulum at the start of the test as indicated in X2.16.

A2.4 Measure and record the energy correction, E_A , for windage of the pendulum plus friction in the dial, as determined with the first swing of the pendulum with no specimen in the testing device. This correction must be read on the energy scale, E_M , appropriate for the pendulum used.

A2.5 Without resetting the position of the indicator obtained in A2.4, measure the energy correction, E_B , for pendulum windage after two additional releases of the pendulum with no specimen in the testing device.

A2.6 Calculate β_{\max} as follows:

$$\beta_{\max} = \cos^{-1} \{1 - [(h_M/L)(1 - E_A/E_M)]\}$$

where:

- E_A = energy correction for windage of pendulum plus friction in dial, J [ft·lbf],
- E_M = full-scale reading for pendulum used, J [ft·lbf],

- L = distance from fulcrum to center of gravity of pendulum, m [ft],
- h_M = maximum height of center of gravity of pendulum at start of test, m [ft], and
- β_{\max} = maximum angle pendulum will travel with one swing of the pendulum.

A2.7 Measure specimen breaking energy, E_s , J [ft·lbf].

A2.8 Calculate β for specimen measurement E_s as:

$$\beta = \cos^{-1} \{1 - [(h_M/L)(1 - E_s/E_M)]\}$$

where:

- β = angle pendulum travels for a given specimen, and
- E_s = dial reading breaking energy for a specimen, J [ft·lbf].

A2.9 Calculate total correction energy, E_{TC} , as:

$$E_{TC} = (E_A - (E_B/2))(\beta/\beta_{\max}) + (E_B/2)$$

where:

- E_{TC} = total correction energy for the breaking energy, E_s , of a specimen, J [ft·lbf], and
- E_B = energy correction for windage of the pendulum, J [ft·lbf].

A2.10 Calculate the impact resistance using the following formula:

$$I_s = (E_s - E_{TC})/t$$

where:

- I_s = impact resistance of specimen, J/m [ft·lbf/in.] of width, and
- t = width of specimen or width of notch, m [in.].

APPENDIXES

(Nonmandatory Information)

X1. PROCEDURE FOR THE INSPECTION AND VERIFICATION OF NOTCH

X1.1 The purpose of this procedure is to describe the microscopic method to be used for determining the radius and angle of the notch. These measurements could also be made using a comparator if available.

NOTE X1.1—The notch shall have a radius of 0.25 ± 0.05 mm [0.010 \pm 0.002 in.] and an angle of $45 \pm 1^\circ$.

X1.2 *Apparatus:*

X1.2.1 *Optical Device* with minimum magnification of 60 \times , Filar glass scale and camera attachment.

X1.2.2 *Transparent Template*, (will be developed in this procedure).

X1.2.3 *Ruler.*

X1.2.4 *Compass.*

X1.2.5 *Plastic 45°–45°–90° Drafting Set Squares (Triangles).*

X1.3 A transparent template must be developed for each magnification and for each microscope used. It is preferable that each laboratory standardize on one microscope and one magnification. It is not necessary for each laboratory to use the same magnification because each microscope and camera combination has somewhat different blowup ratios.

X1.3.1 Set the magnification of the optical device at a suitable magnification with a minimum magnification of 60 \times .

X1.3.2 Place the Filar glass slide on the microscope platform. Focus the microscope so the most distinct image of the Filar scale is visible.

X1.3.3 Take a photograph of the Filar scale (see Fig. X1.1).

X1.3.4 Create a template similar to that shown in Fig. X1.2.

X1.3.4.1 Find the approximate center of the piece of paper.

X1.3.4.2 Draw a set of perpendicular coordinates through the center point.

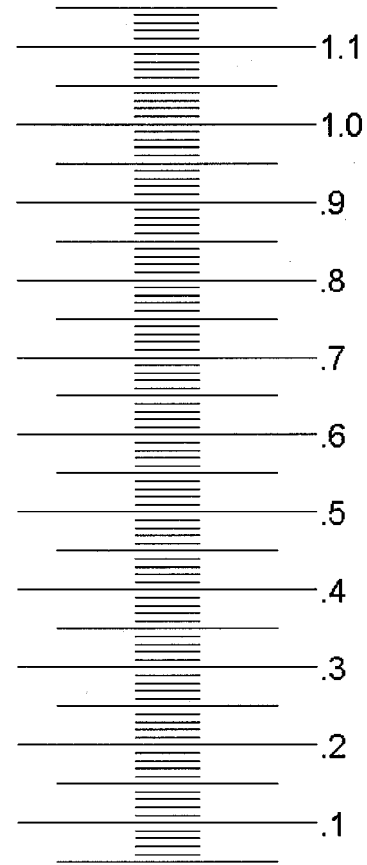
X1.3.4.3 Draw a family of concentric circles that are spaced according to the dimensions of the Filar scale.

X1.3.4.4 This is accomplished by first setting a mechanical compass at a distance of 0.1 mm [0.004 in.] as referenced by the magnified photograph of the Filar eyepiece. Subsequent circles shall be spaced 0.02 mm apart [0.001 in.], as rings with the outer ring being 0.4 mm [0.016 in.] from the center.

X1.3.5 Photocopy the paper with the concentric circles to make a transparent template of the concentric circles.

X1.3.6 Construct Fig. X1.3 by taking a second piece of paper and find its approximate center and mark this point. Draw one line through this center point. Label this line zero degree (0°). Draw a second line perpendicular to the first line through this center point. Label this line “90°.” From the center draw a line that is 44 degrees relative to the “0°.” Label the line “44°.” Draw another line at 46°. Label the line “46°.”

X1.4 Place a microscope glass slide on the microscope platform. Place the notched specimen on top of the slide. Focus the microscope. Move the specimen around using the platform



NOTE 1—100X reference.

NOTE 2—0.1 mm major scale; 0.01 mm minor scale.

FIG. X1.1 Filar Scale

adjusting knobs until the specimen’s notch is centered and near the bottom of the viewing area. Take a picture of the notch.

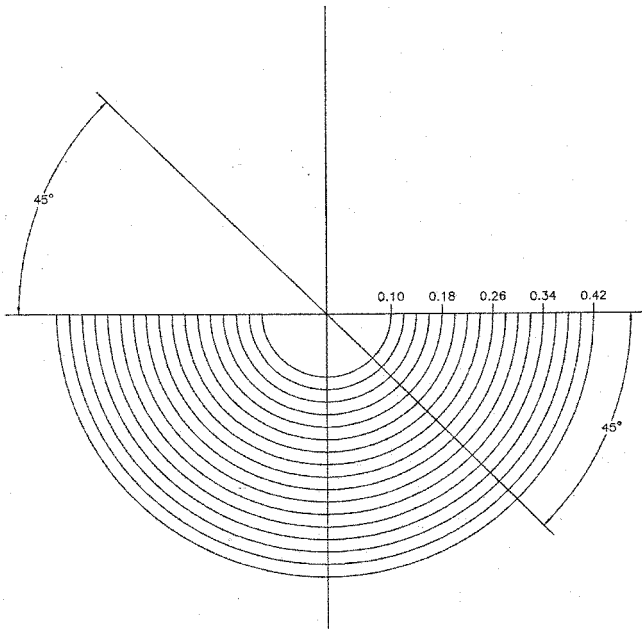
X1.4.1 *Determination of Notching Radius* (see Fig. X1.4):

X1.4.1.1 Place the picture on a sheet of paper. Position the picture so that bottom of the notch in the picture faces downwards and is about 64 mm [2.5 in.] from the bottom of the paper. Tape the picture down to the paper.

X1.4.1.2 Draw two lines along the sides of the notch projecting down to a point where they intersect below Notch Point I (see Fig. X1.4).

X1.4.1.3 Open the compass to about 51 mm [2 in.]. Using Point I as a reference, draw two arcs intersecting both sides of the notch (see Fig. X1.4). These intersections are called 1a and 1b.

X1.4.1.4 Close the compass to about 38 mm [1.5 in.]. Using Point 1a as the reference point draw an arc (2a) above the notch, draw a second arc (2b) that intersects with arc 2a at



NOTE 1—Magnification = 100X.

FIG. X1.2 Example of Transparent Template for Determining Radius of Notch

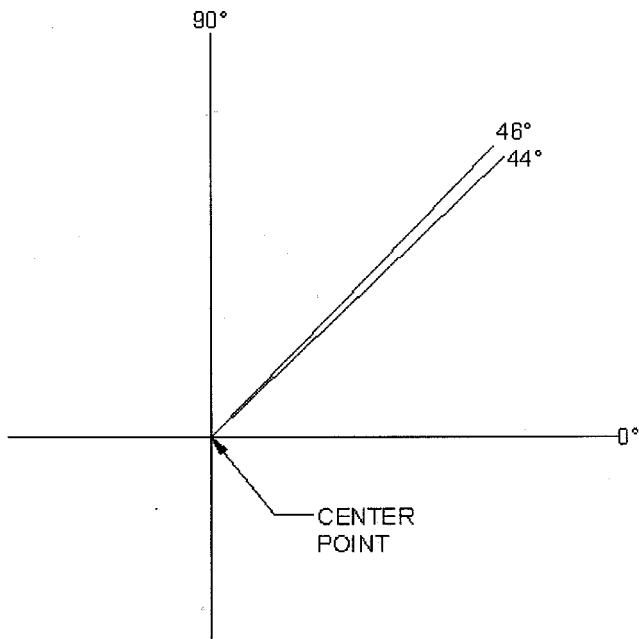


FIG. X1.3 Example of Transparent Template for Determining Angle of Notch

Point J. Draw a line between I and J. This establishes the centerline of the notch (see Fig. X1.4).

X1.4.1.5 Place the transparent template on top of the picture and align the center of the concentric circles with the drawn centerline of the notch (see Fig. X1.4).

X1.4.1.6 Slide the template down the centerline of the notch until one concentric circle touches both sides of the notch.

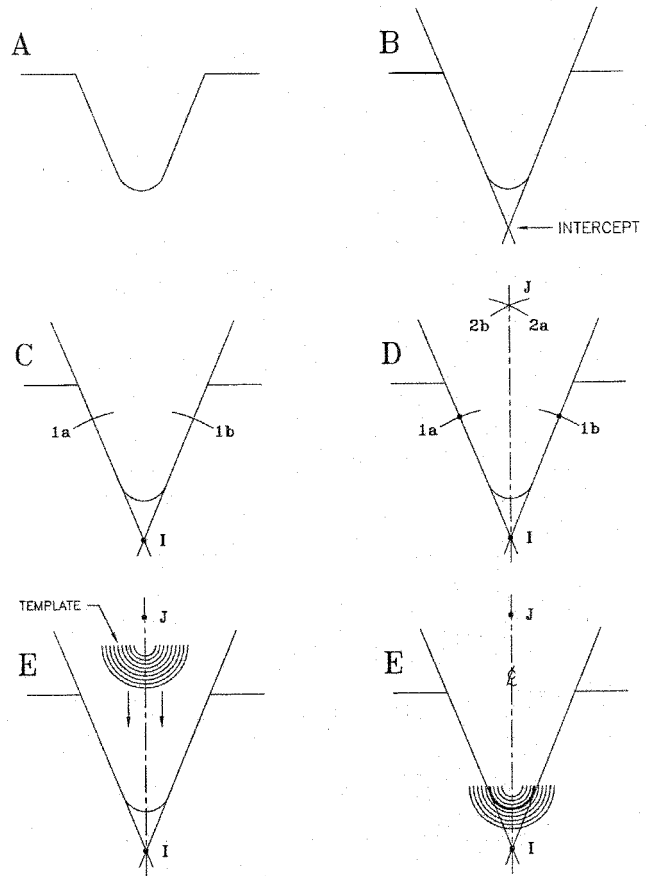


FIG. X1.4 Determination of Notching Radius

Record the radius of the notch and compare it against the ASTM limits of 0.2 to 0.3 mm [0.008 to 0.012 in.].

X1.4.1.7 Examine the notch to ensure that there are no flat spots along the measured radius.

X1.4.2 *Determination of Notch Angle:*

X1.4.2.1 Place transparent template for determining notch angle (see Fig. X1.3) on top of the photograph attached to the sheet of paper. Rotate the picture so that the notch tip is pointed towards you. Position the center point of the template on top of Point I established in 0° axis of the template with the right side straight portion of the notch. Check the left side straight portion of the notch to ensure that this portion falls between the 44 and 46° degree lines. If not, replace the blade.

X1.5 A picture of a notch shall be taken at least every 500 notches or if a control sample gives a value outside its three-sigma limits for that test.

X1.6 If the notch in the control specimen is not within the requirements, a picture of the notching blade should be taken and analyzed by the same procedure used for the specimen notch. If the notching blade does not meet ASTM requirements or shows damage, it should be replaced with a new blade which has been checked for proper dimensions.

X1.7 It is possible that the notching cutter may have the correct dimensions but does not cut the correct notch in the

specimen. If that occurs it will be necessary to evaluate other conditions (cutter and feed speeds) to obtain the correct notch

dimension for that material.

X2. CALIBRATION OF PENDULUM-TYPE HAMMER IMPACT MACHINES FOR USE WITH PLASTIC SPECIMENS

X2.1 This calibration procedure applies specifically to the Izod impact machine. However, much of this procedure can be applied to the Charpy impact machine as well.

X2.2 Locate the impact machine on a sturdy base. It shall not “walk” on the base and the base shall not vibrate appreciably. Loss of energy from vibrations will give high readings. It is recommended that the impact tester be bolted to a base having a mass of at least 23 kg if it is used at capacities higher than 2.7 J [2 ft·lbf].

X2.3 Check the level of the machine in both directions in the plane of the base with spirit levels mounted in the base, by a machinist’s level if a satisfactory reference surface is available, or with a plumb bob. The machine should be made level to within $\tan^{-1} 0.001$ in the plane of swing and to within $\tan^{-1} 0.002$ in the plane perpendicular to the swing.

X2.4 With a straightedge and a feeler gage or a depth gage, check the height of the movable vise jaw relative to the fixed vise jaw. It must match the height of the fixed vise jaw within 0.08 mm [0.003 in.].

X2.5 Contact the machine manufacturer for a procedure to ensure the striker radius is in tolerance (0.80 ± 0.20 mm) (see 6.3).

X2.6 Check the transverse location of the center of the pendulum striking edge that shall be within 0.40 mm [0.016 in.] of the center of the vise. Readjust the shaft bearings or relocate the vise, or straighten the pendulum shaft as necessary to attain the proper relationship between the two centers.

X2.7 Check the pendulum arm for straightness within 1.2 mm [0.05 in.] with a straightedge or by sighting down the shaft. Allowing the pendulum to slam against the catch sometimes bends the arm especially when high-capacity weights are on the pendulum.

X2.8 Insert vertically and center with a locating jig and clamp in the vise a notched machined metal bar 12.7-mm [0.500-in.] square, having opposite sides parallel within 0.025 mm [0.001 in.] and a length of 60 mm [2.4 in.]. Check the bar for vertical alignment within $\tan^{-1} 0.005$ in both directions with a small machinist’s level. Shim up the vise, if necessary, to correct for errors in the plane of pendulum swing, using care to preserve solid support for the vise. For errors in the plane perpendicular to the plane of pendulum swing, machine the inside face of the clamp-type locating jig for correct alignment if this type of jig is used. If a blade-type jig is used, use shims or grind the base of the vise to bring the top surface level.

X2.9 Insert and clamp the bar described in X2.8 in a vertical position in the center of the vise so that the notch in the

bar is slightly below the top edge of the vise. Place a thin film of oil on the striking edge of the pendulum with an oiled tissue and let the striking edge rest gently against the bar. The striking edge should make contact across the entire width of the bar. If only partial contact is made, examine the vise and pendulum for the cause. If the cause is apparent, make the appropriate correction. If no cause is apparent, remove the striker and shim up or grind its back face to realign the striking edge with the surface of the bar.

X2.10 Check the oil line on the face of the bar for horizontal setting of striking edge within $\tan^{-1} 0.002$ with a machinist’s square.

X2.11 Without taking the bar of X2.8 from the vise of the machine, scratch a thin line at the top edge of the vise on the face opposite the striking face of the bar. Remove the bar from the vise and transfer this line to the striking face, using a machinist’s square. The distance from the striking oil line to the top edge of the vise should be 22 ± 0.05 mm [0.87 ± 0.002 in.]. Correct with shims or grinding, as necessary, at the bottom of the vise.

X2.12 When the pendulum is hanging free in its lowest position, the energy reading must be within 0.2 % of full scale.

X2.13 Insert the bar of X2.8 into the vise and clamp it tightly in a vertical position. When the striking edge is held in contact with the bar, the energy reading must be within 0.2 % of full scale.

X2.14 Swing the pendulum to a horizontal position and support it by the striking edge in this position with a vertical bar. Allow the other end of this bar to rest at the center of a load pan on a balanced scale. Subtract the weight of the bar from the total weight to find the effective weight of the pendulum. The effective pendulum weight should be within 0.4 % of the required weight for that pendulum capacity. If weight must be added or removed, take care to balance the added or removed weight without affecting the center of percussion relative to the striking edge. It is not advisable to add weight to the opposite side of the bearing axis from the striking edge to decrease the effective weight of the pendulum since the distributed mass can lead to large energy losses from vibration of the pendulum.

X2.15 Calculate the effective length of the pendulum arm, or the distance to the center of percussion from the axis of rotation, by the procedure in Note 9. The effective length must be within the tolerance stated in 6.3.

X2.16 Measure the vertical distance of fall of the pendulum striking edge from its latched height to its lowest point. This distance should be 610 ± 2.0 mm [24 ± 0.1 in.]. This

measurement may be made by blocking up a level on the top of the vise and measuring the vertical distance from the striking edge to the bottom of the level (top of vise) and subtracting 22.0 mm [0.9 in.]. The vertical falling distance may be adjusted by varying the position of the pendulum latch.

X2.17 Notch a standard specimen on one side, parallel to the molding pressure, at 32 mm [1.25 in.] from one end. The depth of the plastic material remaining in the specimen under the notch shall be 10.16 ± 0.05 mm [0.400 ± 0.002 in.]. Use a jig to position the specimen correctly in the vise. When the specimen is clamped in place, the center of the notch should be within 0.12 mm [0.005 in.] of being in line with the top of the fixed surface of the vise and the specimen should be centered midway within 0.40 mm [0.016 in.] between the sides of the clamping faces. The notched face should be the striking face of the specimen for the Izod test. Under no circumstances during the breaking of the specimen should the top of the specimen touch the pendulum except at the striking edge.

X2.18 If a clamping-type locating jig is used, examine the clamping screw in the locating jig. If the thread has a loose fit the specimen may not be correctly positioned and may tend to creep as the screw is tightened. A burred or bent point on the screw may also have the same effect.

X2.19 If a pointer and dial mechanism is used to indicate the energy, the pointer friction should be adjusted so that the pointer will just maintain its position anywhere on the scale. The striking pin of the pointer should be securely fastened to the pointer. Friction washers with glazed surfaces should be replaced with new washers. Friction washers should be on either side of the pointer collar. A heavy metal washer should back the last friction washer installed. Pressure on this metal washer is produced by a thin-bent, spring washer and locknuts. If the spring washer is placed next to the fiber friction washer the pointer will tend to vibrate during impact.

X2.20 The free-swing reading of the pendulum (without specimen) from the latched height should be less than 2.5 % of pendulum capacity on the first swing. If the reading is higher than this, then the friction in the indicating mechanism is excessive or the bearings are dirty. To clean the bearings, dip them in grease solvent and spin-dry in an air jet. Clean the bearings until they spin freely, or replace them. Oil very lightly with instrument oil before replacing. A reproducible method of starting the pendulum from the proper height must be devised.

X2.21 The shaft about which the pendulum rotates shall

have no detectable radial play (less than 0.05 mm [0.002 in.]). An endplay of 0.25 mm [0.010 in.] is permissible when a 9.8-N [2.2-lbf] axial force is applied in alternate directions.

X2.22 The clamping faces of the vise should be parallel in the horizontal and vertical directions within 0.025 mm [0.001 in.]. Inserting the machined square metal bar of X2.7 into the vise in a vertical position and clamping until the jaws begin to bind may check parallelism. Any freedom between the metal bar and the clamping surfaces of the jaws of the vise must not exceed the specified tolerance.

X2.23 The top edges of the fixed and moveable jaws of the vise shall have a radius of 0.25 ± 0.12 mm [0.010 ± 0.005 in.]. Depending upon whether Test Method A, C, D, or E is used, a stress concentration may be produced as the specimen breaks. Consequently, the top edge of the fixed and moveable jaw needs to be carefully examined.

X2.24 If a brittle unfilled or granular-filled plastic bar such as a general-purpose wood-flour-filled phenolic material is available, notch and break a set of bars in accordance with these test methods. Examine the surface of the break of each bar in the vise. If the break is flat and smooth across the top surface of the vise, the condition of the machine is excellent. Considerable information regarding the condition of an impact machine can be obtained by examining the broken sections of specimens. No weights should be added to the pendulum for the preceding tests.

X2.25 The machine should not be used to indicate more than 85 % of the energy capacity of the pendulum. Extra weight added to the pendulum will increase available energy of the machine. This weight must be added so as to maintain the center of percussion within the tolerance stated in 6.3. Correct effective weight for any range can be calculated as follows:

$$W = E_p/h$$

where:

W = effective pendulum weight, N [lbf] (see X2.13),

E_p = potential or available energy of the machine, J [ft·lbf], and

h = vertical distance of fall of the pendulum striking edge, m [ft] (see X2.16).

Each 4.5 N [1 lbf] of added effective weight increases the capacity of the machine by 2.7 J [2 ft·lbf].

NOTE X2.1—If the pendulum is designed for use with add-on weight, it is recommended that it be obtained through the equipment manufacturer.

X3. DERIVATION OF PENDULUM IMPACT CORRECTION EQUATIONS

X3.1 From right triangle distances in Fig. X3.1:

$$L - h = L \cos \beta \quad (X3.1)$$

X3.2 But the potential energy gain of pendulum E_p is:

$$E_p = hW_p g \quad (X3.2)$$

X3.3 Combining Eq X3.1 and Eq X3.2 gives the following:

$$L - E_p/W_p g = L \cos \beta \quad (X3.3)$$

X3.4 The maximum energy of the pendulum is the potential energy at the start of the test, E_M , or

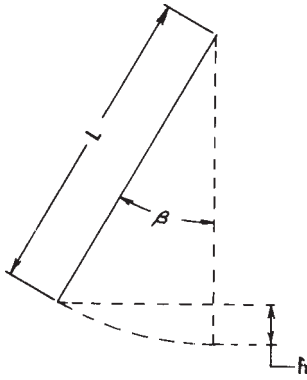


FIG. X3.1 Swing of Pendulum from Its Rest Position

$$E_M = h_M W_p g \quad (X3.4)$$

X3.5 The potential energy gained by the pendulum, E_p , is related to the absorption of energy of a specimen, E_s , by the following equation:

$$E_M - E_s = E_p \quad (X3.5)$$

X3.6 Combining Eq X3.3-X3.5 gives the following:

$$(E_M - E_s)/E_M = L/h_M (1 - \cos \beta) \quad (X3.6)$$

X3.7 Solving Eq X3.6 for β gives the following:

$$\beta = \cos^{-1}\{1 - [(h_M/L)(1 - E_s/E_M)]\} \quad (X3.7)$$

X3.8 From Fig. X3.2, the total energy correction E_{TC} is given as:

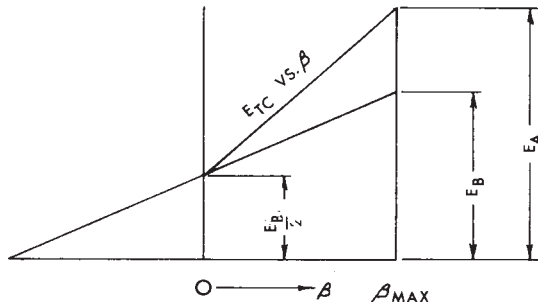


FIG. X3.2 Total Energy Correction for Pendulum Windage and Dial Friction as a Function of Pendulum Position

$$E_{TC} = m\beta + b \quad (X3.8)$$

X3.9 But at the zero point of the pendulum potential energy:

$$E_B/2 = m(0) + b \quad (X3.9)$$

or:

$$b = E_B/2 \quad (X3.10)$$

X3.10 The energy correction, E_A , on the first swing of the pendulum occurs at the maximum pendulum angle, β_{max} . Substituting in Eq X3.8 gives the following:

$$E_A = m\beta_{max} + (E_B/2) \quad (X3.11)$$

X3.11 Combining Eq X3.8 and Eq X3.11 gives the following:

$$E_{TC} = (E_A - (E_B/2))(\beta/\beta_{max}) + (E_B/2) \quad (X3.12)$$

X3.12 Nomenclature:

- b = intercept of total correction energy straight line,
- E_A = energy correction, including both pendulum windage plus dial friction, J,
- E_B = energy correction for pendulum windage only, J,
- E_M = maximum energy of the pendulum (at the start of test), J,
- E_p = potential energy gain of pendulum from the pendulum rest position, J,
- E_s = uncorrected breaking energy of specimen, J,
- E_{TC} = total energy correction for a given breaking energy, E_s , J,
- g = acceleration of gravity, m/s^2 ,
- h = distance center of gravity of pendulum rises vertically from the rest position of the pendulum, m,
- h_M = maximum height of the center of gravity of the pendulum, m,
- m = slope of total correction energy straight line,
- L = distance from fulcrum to center of gravity of pendulum, m,
- W_p = weight of pendulum, as determined in X2.13, kg, and
- β = angle of pendulum position from the pendulum rest position.

X4. UNIT CONVERSIONS

X4.1 Joules per metre (J/m) cannot be converted directly into kJ/m^2 . Note that the optional units of kJ/m^2 [ft·lbf/in.²] may also be required; therefore, the cross-sectional area under the notch must be reported.

X4.2 The following examples are approximations:

X4.2.1 Example 1:

$$1 \text{ ft}\cdot\text{lbf}/39.37 \text{ in.} = 1.356 \text{ J/m}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ ft}\cdot\text{lbf}/\text{in.} &= (39.37)(1.356) \text{ J/m} \\ 1 \text{ ft}\cdot\text{lbf}/\text{in.}^2 &= 53.4 \text{ J/m} \\ 1 \text{ ft}\cdot\text{lbf}/\text{in.} &= 0.0534 \text{ kJ/m} \end{aligned}$$

X4.2.2 Example 2:

$$\begin{aligned} 1 \text{ ft}\cdot\text{lbf}/1550 \text{ in.}^2 &= 1.356 \text{ J/m}^2 \\ 1 \text{ ft}\cdot\text{lbf}/\text{in.}^2 &= (1550)(1.356) \text{ J/m}^2 \\ 1 \text{ ft}\cdot\text{lbf}/\text{in.}^2 &= 2101 \text{ J/m}^2 \\ 1 \text{ ft}\cdot\text{lbf}/\text{in.}^2 &= 2.1 \text{ kJ/m}^2 \end{aligned}$$

SUMMARY OF CHANGES

This section identifies the location of selected changes to these test methods. For the convenience of the user, Committee D20 has highlighted those changes that may impact the use of this test method. This section may also include descriptions of the changes or reasons for the changes, or both.

D 256 – 04:

(1) Replaced Figs. X1.1-X1.4 with clearer versions.

D 256 – 03:

(1) Added reference to Test Methods D 5947.

(2) Added paragraphs 6.13 and 10.6.

(3) Revised paragraphs 8.4 and 10.5.

D 256 – 02:

(1) Value conversions corrected in 7.2.1, 7.2.2., and 7.4.1.

(2) Added new paragraph 7.1.1. Renumbered subsequent paragraphs.

(3) Fixed Fig. 5 to reflect paragraph location for width measurement.

D 256 – 00:

(1) Notch depth dimensions in 8.4, Fig. 6, and X2.17 changed to 10.16 ± 0.05 mm.

(2) Note 8 added.

(3) Deleted former Appendix X4 on Determination of Clamping Load on Izod Specimens.

D 256 – 97:

(1) Test Method B (Charpy) has been removed from these test methods. This test method is being developed as a separate standard. Research Report D20-1034 will be moved to the new Charpy standard.

(2) The designations for Test Methods A, C, D, or E remain unchanged due to potential problems with historical data.

(3) These test methods have been extensively revised, editorially and technically, with major emphasis on tolerances and units.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



ANEXO B.-



Standard Test Method for Water Absorption of Plastics¹

This standard is issued under the fixed designation D 570; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the relative rate of absorption of water by plastics when immersed. This test method is intended to apply to the testing of all types of plastics, including cast, hot-molded, and cold-molded resinous products, and both homogeneous and laminated plastics in rod and tube form and in sheets 0.13 mm (0.005 in.) or greater in thickness.

1.2 The values given in SI units are to be regarded as the standard. The values stated in parentheses are for information only.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

NOTE 1—ISO 62 is technically equivalent to this test method.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 647 Practice for Design of Molds for Test Specimens of Plastic Molding Materials²

2.2 ISO Standard:

ISO 62 Plastics—Determination of Water Absorption³

3. Significance and Use

3.1 This test method for rate of water absorption has two chief functions: first, as a guide to the proportion of water absorbed by a material and consequently, in those cases where the relationships between moisture and electrical or mechanical properties, dimensions, or appearance have been determined, as a guide to the effects of exposure to water or humid conditions on such properties; and second, as a control test on the uniformity of a product. This second function is particularly applicable to sheet, rod, and tube arms when the test is made on the finished product.

3.2 Comparison of water absorption values of various plastics can be made on the basis of values obtained in accordance with 7.1 and 7.4.

3.3 Ideal diffusion of liquids⁴ into polymers is a function of the square root of immersion time. Time to saturation is strongly dependent on specimen thickness. For example, Table 1 shows the time to approximate time saturation for various thickness of nylon-6.

3.4 The moisture content of a plastic is very intimately related to such properties as electrical insulation resistance, dielectric losses, mechanical strength, appearance, and dimensions. The effect upon these properties of change in moisture content due to water absorption depends largely on the type of exposure (by immersion in water or by exposure to high humidity), shape of the part, and inherent properties of the plastic. With nonhomogeneous materials, such as laminated forms, the rate of water absorption may be widely different through each edge and surface. Even for otherwise homogeneous materials, it may be slightly greater through cut edges than through molded surfaces. Consequently, attempts to correlate water absorption with the surface area must generally be limited to closely related materials and to similarly shaped specimens: For materials of widely varying density, relation between water-absorption values on a volume as well as a weight basis may need to be considered.

4. Apparatus

4.1 *Balance*—An analytical balance capable of reading 0.0001 g.

4.2 *Oven*, capable of maintaining uniform temperatures of $50 \pm 3^\circ\text{C}$ ($122 \pm 5.4^\circ\text{F}$) and of 105 to 110°C (221 to 230°F).

5. Test Specimen

5.1 The test specimen for molded plastics shall be in the form of a disk 50.8 mm (2 in.) in diameter and 3.2 mm ($\frac{1}{8}$ in.) in thickness (see Note 2). Permissible variations in thickness are ± 0.18 mm (± 0.007 in.) for hot-molded and ± 0.30 mm (± 0.012 in.) for cold-molded or cast materials.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D 20.50 on Permanence Properties.

Current edition approved July 10, 1998. Published January 1999. Originally published as D 570 – 40 T. Last previous edition D 570 – 95.

² Discontinued 1994; replaced by D 1896, D 3419, D 3641, D 4703, and D 5227. See 1994 *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.01.

³ Available from American National Standards Institute, 11 W. 42nd St., 13th Floor, New York, NY 10036.

⁴ Additional information regarding diffusion of liquids in polymers can be found in the following references: (1) *Diffusion, Mass Transfer in Fluid Systems*, E. L. Cussler, Cambridge University Press, 1985, ISBN 0-521-29846-6, (2) *Diffusion in Polymers*, J. Crank and G. S. Park, Academic Press, 1968, and (3) "Permeation, Diffusion, and Sorption of Gases and Vapors," R. M. Felder and G. S. Huvard, in *Methods of Experimental Physics*, Vol 16C, 1980, Academic Press.

TABLE 1 Time to Saturation for Various Thickness of Nylon-6

Thickness, mm	Typical Time to 95 % Saturation, h
1	100
2	400
3.2	1 000
10	10 000
25	62 000

NOTE 2—The disk mold prescribed in the Molds for Disk Test Specimens Section of Practice D 647 is suitable for molding disk test specimens of thermosetting materials but not thermoplastic materials.

5.2 *ISO Standard Specimen*—The test specimen for homogeneous plastics shall be 60 by 60 by 1 mm. Tolerance for the 60-mm dimension is ± 2 mm and ± 0.05 mm for the 1-mm thickness. This test method and ISO 62 are technically equivalent when the test specimen described in 5.2 is used.

5.3 The test specimen for sheets shall be in the form of a bar 76.2 mm (3 in.) long by 25.4 mm (1 in.) wide by the thickness of the material. When comparison of absorption values with molded plastics is desired, specimens 3.2 mm ($\frac{1}{8}$ in.) thick should be used. Permissible variations in thickness shall be 0.20 mm (± 0.008 in.) except for asbestos-fabric-base phenolic laminated materials or other materials which have greater standard commercial tolerances.

5.4 The test specimen for rods shall be 25.4 mm (1 in.) long for rods 25.4 mm in diameter or under and 12.7 mm ($\frac{1}{2}$ in.) long for larger-diameter rods. The diameter of the specimen shall be the diameter of the finished rod.

5.5 The test specimen for tubes less than 76 mm (3 in.) in inside diameter shall be the full section of the tube and 25.4 mm (1 in.) long. For tubes 76 mm (3 in.) or more in inside diameter, a rectangular specimen shall be cut 76 mm in length in the circumferential direction of the tube and 25.4 mm in width lengthwise of the tube.

5.6 The test specimens for sheets, rods, and tubes shall be machined, sawed, or sheared from the sample so as to have smooth edges free from cracks. The cut edges shall be made smooth by finishing with No. 0 or finer sandpaper or emery cloth. Sawing, machining, and sandpapering operations shall be slow enough so that the material is not heated appreciably.

NOTE 3—If there is any oil on the surface of the specimen when received or as a result of machining operations, wash the specimen with a cloth wet with gasoline to remove oil, wipe with a dry cloth, and allow to stand in air for 2 h to permit evaporation of the gasoline. If gasoline attacks the plastic, use some suitable solvent or detergent that will evaporate within the 2-h period.

5.7 The dimensions listed in the following table for the various specimens shall be measured to the nearest 0.025 mm (0.001 in.). Dimensions not listed shall be measured within 0.8 mm ($\pm \frac{1}{32}$ in.).

Type of Specimen	Dimensions to Be Measured to the Nearest 0.025 mm (0.001 in.)
Molded disk	thickness
Sheet	thickness
Rod	length and diameter
Tube	inside and outside diameter, and wall thickness

6. Conditioning

6.1 Three specimens shall be conditioned as follows:

6.1.1 Specimens of materials whose water-absorption value would be appreciably affected by temperatures in the neighborhood of 110°C (230°F), shall be dried in an oven for 24 h at $50 \pm 3^\circ\text{C}$ ($122 \pm 5.4^\circ\text{F}$), cooled in a desiccator, and immediately weighed to the nearest 0.001 g.

NOTE 4—If a static charge interferes with the weighing, lightly rub the surface of the specimens with a grounded conductor.

6.1.2 Specimens of materials, such as phenolic laminated plastics and other products whose water-absorption value has been shown not to be appreciably affected by temperatures up to 110°C (230°F), shall be dried in an oven for 1 h at 105 to 110°C (221 to 230°F).

6.1.3 When data for comparison with absorption values for other plastics are desired, the specimens shall be dried in an oven for 24 h at $50 \pm 3^\circ\text{C}$ ($122 \pm 5.4^\circ\text{F}$), cooled in a desiccator, and immediately weighed to the nearest 0.001 g.

7. Procedure

7.1 *Twenty-Four Hour Immersion*—The conditioned specimens shall be placed in a container of distilled water maintained at a temperature of $23 \pm 1^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 1.8^\circ\text{F}$), and shall rest on edge and be entirely immersed. At the end of 24, + $\frac{1}{2}$, –0 h, the specimens shall be removed from the water one at a time, all surface water wiped off with a dry cloth, and weighed to the nearest 0.001 g immediately. If the specimen is $\frac{1}{16}$ in. or less in thickness, it shall be put in a weighing bottle immediately after wiping and weighed in the bottle.

7.2 *Two-Hour Immersion*—For all thicknesses of materials having a relatively high rate of absorption, and for thin specimens of other materials which may show a significant weight increase in 2 h, the specimens shall be tested as described in 7.1 except that the time of immersion shall be reduced to 120 ± 4 min.

7.3 *Repeated Immersion*—A specimen may be weighed to the nearest 0.001 g after 2-h immersion, replaced in the water, and weighed again after 24 h.

NOTE 5—In using this test method the amount of water absorbed in 24 h may be less than it would have been had the immersion not been interrupted.

7.4 *Long-Term Immersion*—To determine the total water absorbed when substantially saturated, the conditioned specimens shall be tested as described in 7.1 except that at the end of 24 h they shall be removed from the water, wiped free of surface moisture with a dry cloth, weighed to the nearest 0.001 g immediately, and then replaced in the water. The weighings shall be repeated at the end of the first week and every two weeks thereafter until the increase in weight per two-week period, as shown by three consecutive weighings, averages less than 1 % of the total increase in weight or 5 mg, whichever is greater; the specimen shall then be considered substantially saturated. The difference between the substantially saturated weight and the dry weight shall be considered as the water absorbed when substantially saturated.

7.5 *Two-Hour Boiling Water Immersion*—The conditioned specimens shall be placed in a container of boiling distilled water, and shall be supported on edge and be entirely immersed. At the end of 120 ± 4 min, the specimens shall be

removed from the water and cooled in distilled water maintained at room temperature. After 15 ± 1 min, the specimens shall be removed from the water, one at a time, all surface water removed with a dry cloth, and the specimens weighed to the nearest 0.001 g immediately. If the specimen is $\frac{1}{16}$ in. or less in thickness, it shall be weighed in a weighing bottle.

7.6 One-Half-Hour Boiling Water Immersion—For all thicknesses of materials having a relatively high rate of absorption and for thin specimens of other materials which may show a significant weight increase in $\frac{1}{2}$ h, the specimens shall be tested as described in 7.5, except that the time of immersion shall be reduced to 30 ± 1 min.

7.7 Immersion at 50°C—The conditioned specimens shall be tested as described in 7.5, except that the time and temperature of immersion shall be 48 ± 1 h and $50 \pm 1^\circ\text{C}$ ($122.0 \pm 1.8^\circ\text{F}$), respectively, and cooling in water before weighing shall be omitted.

7.8 When data for comparison with absorption values for other plastics are desired, the 24-h immersion procedure described in 7.1 and the equilibrium value determined in 7.4 shall be used.

8. Reconditioning

8.1 When materials are known or suspected to contain any appreciable amount of water-soluble ingredients, the specimens, after immersion, shall be weighed, and then reconditioned for the same time and temperature as used in the original drying period. They shall then be cooled in a desiccator and immediately reweighed. If the reconditioned weight is lower than the conditioned weight, the difference shall be considered as water-soluble matter lost during the immersion test. For such materials, the water-absorption value shall be taken as the sum of the increase in weight on immersion and of the weight of the water-soluble matter.

9. Calculation and Report

9.1 The report shall include the values for each specimen and the average for the three specimens as follows:

9.1.1 Dimensions of the specimens before test, measured in accordance with 5.6, and reported to the nearest 0.025 mm (0.001 in.),

9.1.2 Conditioning time and temperature,

9.1.3 Immersion procedure used,

9.1.4 Time of immersion (long-term immersion procedure only),

9.1.5 Percentage increase in weight during immersion, calculated to the nearest 0.01 % as follows:

$$\text{Increase in weight, \%} = \frac{\text{wet weight} - \text{conditioned weight}}{\text{conditioned weight}} \times 100$$

9.1.6 Percentage of soluble matter lost during immersion, if determined, calculated to the nearest 0.01 % as follows (see Note 6):

$$\text{Soluble matter lost, \%} = \frac{\text{conditioned weight} - \text{reconditioned weight}}{\text{conditioned weight}} \times 100$$

NOTE 6—When the weight on reconditioning the specimen after immersion in water exceeds the conditioned weight prior to immersion, report “none” under 9.1.6.

9.1.7 For long-term immersion procedure only, prepare a graph of the increase in weight as a function of the square root of each immersion time. The initial slope of this graph is proportional to the diffusion constant of water in the plastic. The plateau region with little or no change in weight as a function of the square root of immersion time represents the saturation water content of the plastic.

NOTE 7—Deviation from the initial slope and plateau model indicates that simple diffusion may be a poor model for determining water content. In such cases, additional studies are suggested to determine a better model for water absorption.

9.1.8 The percentage of water absorbed, which is the sum of the values in 9.1.5 and 9.1.6, and

9.1.9 Any observations as to warping, cracking, or change in appearance of the specimens.

10. Precision and Bias⁵

10.1 Precision—An interlaboratory test program was carried out using the procedure outlined in 7.1, involving three laboratories and three materials. Analysis of this data yields the following coefficients of variation (average of three replicates).

	Within Laboratories	Between Laboratories
Average absorption above 1 % (2 materials)	2.33 %	4.89 %
Average absorption below 0.2 % (1 material)	9.01 %	16.63 %

NOTE 8—A round robin is currently under way to more completely determine repeatability and reproducibility of this test method.

10.2 Bias—No justifiable statement on the bias of this test method can be made, since the true value of the property cannot be established by an accepted referee method.

11. Keywords

11.1 absorption; immersion; plastics; water

⁵ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR: D-20-1064.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.



D 570

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



ANEXO C.-



Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics¹

This standard is issued under the fixed designation D 695; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope *

1.1 This test method covers the determination of the mechanical properties of unreinforced and reinforced rigid plastics, including high-modulus composites, when loaded in compression at relatively low uniform rates of straining or loading. Test specimens of standard shape are employed.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values in parentheses are for information only.

NOTE 1—For compressive properties of resin-matrix composites reinforced with oriented continuous, discontinuous, or cross-ply reinforcements, tests may be made in accordance with Test Method D 3410.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.* A specific precautionary statement is given in Note 11.

NOTE 2—This test method is technically equivalent to ISO 604.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- D 618 Practice for Conditioning Plastics for Testing²
- D 638 Test Method for Tensile Properties of Plastics²
- D 883 Terminology Relating to Plastics²
- D 3410 Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading³
- D 4000 Classification System for Specifying Plastic Materials⁴
- D 4066 Classification System for Nylon Injection and Extrusion Materials⁴
- D 5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastics Specimens⁵

- E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines⁶
- E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometers⁶
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method⁷

3. Terminology

3.1 General—The definitions of plastics used in this test method are in accordance with Terminology D 883 unless otherwise indicated.

3.2 Definitions:

3.2.1 *compressive deformation*—the decrease in length produced in the gage length of the test specimen by a compressive load. It is expressed in units of length.

3.2.2 *compressive strain*—the ratio of compressive deformation to the gage length of the test specimen, that is, the change in length per unit of original length along the longitudinal axis. It is expressed as a dimensionless ratio.

3.2.3 *compressive strength*—the maximum compressive stress (nominal) carried by a test specimen during a compression test. It may or may not be the compressive stress (nominal) carried by the specimen at the moment of rupture.

3.2.4 *compressive strength at failure (nominal)*—the compressive stress (nominal) sustained at the moment of failure of the test specimen if shattering occurs.

3.2.5 *compressive stress (nominal)*—the compressive load per unit area of minimum original cross section within the gage boundaries, carried by the test specimen at any given moment. It is expressed in force per unit area.

3.2.5.1 *Discussion*—The expression of compressive properties in terms of the minimum original cross section is almost universally used. Under some circumstances the compressive properties have been expressed per unit of prevailing cross section. These properties are called “true” compressive properties.

3.2.6 *compressive stress-strain diagram*—a diagram in which values of compressive stress are plotted as ordinates against corresponding values of compressive strain as abscissas.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties. Current edition approved August 10, 2002. Published October 2002. Originally published as D 695 – 42 T. Last previous edition D 695 – 02.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.01.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.03.

⁴ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.02.

⁵ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.03.

⁶ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

⁷ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

3.2.7 *compressive yield point*—the first point on the stress-strain diagram at which an increase in strain occurs without an increase in stress.

3.2.8 *compressive yield strength*—normally the stress at the yield point (see also section 3.2.11).

3.2.9 *crushing load*—the maximum compressive force applied to the specimen, under the conditions of testing, that produces a designated degree of failure.

3.2.10 *modulus of elasticity*—the ratio of stress (nominal) to corresponding strain below the proportional limit of a material. It is expressed in force per unit area based on the average initial cross-sectional area.

3.2.11 *offset compressive yield strength*—the stress at which the stress-strain curve departs from linearity by a specified percent of deformation (offset).

3.2.12 *percent compressive strain*—the compressive deformation of a test specimen expressed as a percent of the original gage length.

3.2.13 *proportional limit*—the greatest stress that a material is capable of sustaining without any deviation from proportionality of stress to strain (Hooke's law). It is expressed in force per unit area.

3.2.14 *slenderness ratio*—the ratio of the length of a column of uniform cross section to its least radius of gyration. For specimens of uniform rectangular cross section, the radius of gyration is 0.289 times the smaller cross-sectional dimension. For specimens of uniform circular cross section, the radius of gyration is 0.250 times the diameter.

4. Significance and Use

4.1 Compression tests provide information about the compressive properties of plastics when employed under conditions approximating those under which the tests are made.

4.2 Compressive properties include modulus of elasticity, yield stress, deformation beyond yield point, and compressive strength (unless the material merely flattens but does not fracture). Materials possessing a low order of ductility may not exhibit a yield point. In the case of a material that fails in compression by a shattering fracture, the compressive strength has a very definite value. In the case of a material that does not fail in compression by a shattering fracture, the compressive strength is an arbitrary one depending upon the degree of distortion that is regarded as indicating complete failure of the material. Many plastic materials will continue to deform in compression until a flat disk is produced, the compressive stress (nominal) rising steadily in the process, without any well-defined fracture occurring. Compressive strength can have no real meaning in such cases.

4.3 Compression tests provide a standard method of obtaining data for research and development, quality control, acceptance or rejection under specifications, and special purposes. The tests cannot be considered significant for engineering design in applications differing widely from the load-time scale of the standard test. Such applications require additional tests such as impact, creep, and fatigue.

4.4 Before proceeding with this test method, reference should be made to the ASTM specification for the material being tested. Any test specimen preparation, conditioning, dimensions, and testing parameters covered in the materials

specification shall take precedence over those mentioned in this test method. If there is no material specification, then the default conditions apply. Table 1 in Classification D 4000 lists the ASTM materials standards that currently exist.

5. Apparatus

5.1 *Testing Machine*—Any suitable testing machine capable of control of constant-rate-of-crosshead movement and comprising essentially the following:

5.1.1 *Drive Mechanism*—A drive mechanism for imparting to the movable cross-head member, a uniform, controlled velocity with respect to the base (fixed member), with this velocity to be regulated as specified in Section 9.

5.1.2 *Load Indicator*—A load-indicating mechanism capable of showing the total compressive load carried by the test specimen. The mechanism shall be essentially free from inertia-lag at the specified rate of testing and shall indicate the load with an accuracy of $\pm 1\%$ of the maximum indicated value of the test (load). The accuracy of the testing machine shall be verified at least once a year in accordance with Practices E 4.

5.2 *Compressometer*—A suitable instrument for determining the distance between two fixed points on the test specimen at any time during the test. It is desirable that this instrument automatically record this distance (or any change in it) as a function of the load on the test specimen. The instrument shall be essentially free of inertia-lag at the specified rate of loading and shall conform to the requirements for a Class B-2 extensometer as defined in Practice E 83.

NOTE 3—The requirements for extensometers cited herein apply to compressometers as well.

5.3 *Compression Tool*—A compression tool for applying the load to the test specimen. This tool shall be so constructed that loading is axial within 1:1000 and applied through surfaces that are flat within 0.025 mm (0.001 in.) and parallel to each other in a plane normal to the vertical loading axis. Examples of suitable compression tools are shown in Fig. 1 and Fig. 2.

5.4 *Supporting Jig*—A supporting jig for thin specimens is shown in Fig. 3 and Fig. 4.

5.5 *Micrometers*—Suitable micrometers, reading to 0.01 mm or 0.001 in. for measuring the width, thickness, and length of the specimens.

6. Test Specimens

6.1 Unless otherwise specified in the materials specifications, the specimens described in 6.2 and 6.7 shall be used. These specimens may be prepared by machining operations from materials in sheet, plate, rod, tube, or similar form, or they may be prepared by compression or injection molding of the material to be tested. All machining operations shall be done carefully so that smooth surfaces result. Great care shall be taken in machining the ends so that smooth, flat parallel surfaces and sharp, clean edges, to within 0.025 mm (0.001 in.) perpendicular to the long axis of the specimen, result.

6.2 The standard test specimen, except as indicated in 6.3-6.7, shall be in the form of a right cylinder or prism whose length is twice its principal width or diameter. Preferred specimen sizes are 12.7 by 12.7 by 25.4 mm (0.50 by 0.50 by

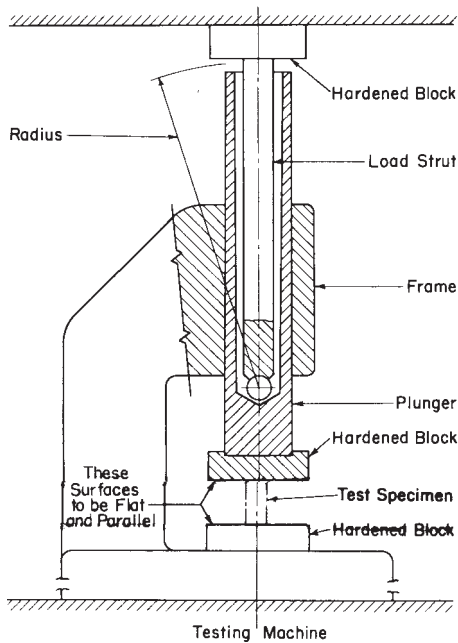


FIG. 1 Subpress for Compression Tests

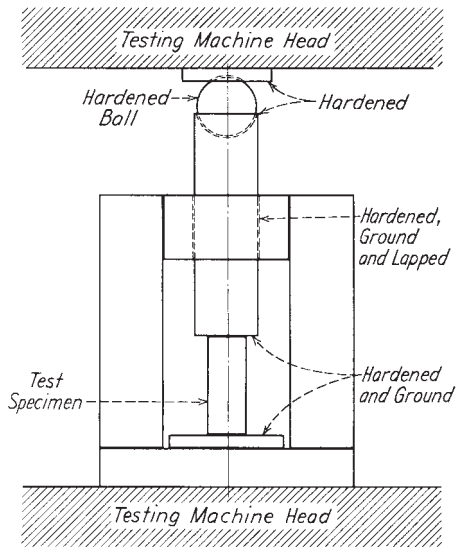


FIG. 2 Compression Tool

1 in.) (prism), or 12.7 mm in diameter by 25.4 mm (cylinder). Where elastic modulus and offset yield-stress data are desired, the test specimen shall be of such dimensions that the slenderness ratio is in the range from 11 to 16:1. In this case, preferred specimen sizes are 12.7 by 12.7 by 50.8 mm (0.50 by 0.50 by 2 in.) (prism), or 12.7 mm in diameter by 50.8 mm (cylinder).

6.3 For rod material, the test specimen shall have a diameter equal to the diameter of the rod and a sufficient length to allow a specimen slenderness ratio in the range from 11 to 16:1.

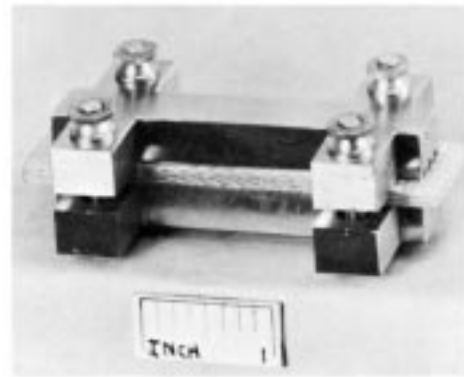


FIG. 3 Support Jig for Thin Specimen

6.4 When testing tubes, the test specimen shall have a diameter equal to the diameter of the tube and a length of 25.4 mm (1 in.) (Note 4). For crushing-load determinations (at right angles to the longitudinal axis), the specimen size shall be the same, with the diameter becoming the height.

NOTE 4—This specimen can be used for tubes with a wall thickness of 1 mm (0.039 in.) or over, to inside diameters of 6.4 mm (0.25 in.) or over, and to outside diameters of 50.8 mm (2.0 in.) or less.

6.5 Where it is desired to test conventional high-pressure laminates in the form of sheets, the thickness of which is less than 25.4 mm (1 in.), a pile-up of sheets 25.4 mm square, with a sufficient number of layers to produce a height of at least 25.4 mm, may be used.

6.6 When testing material that may be suspected of anisotropy, duplicate sets of test specimens shall be prepared having their long axis respectively parallel with and normal to the suspected direction of anisotropy.

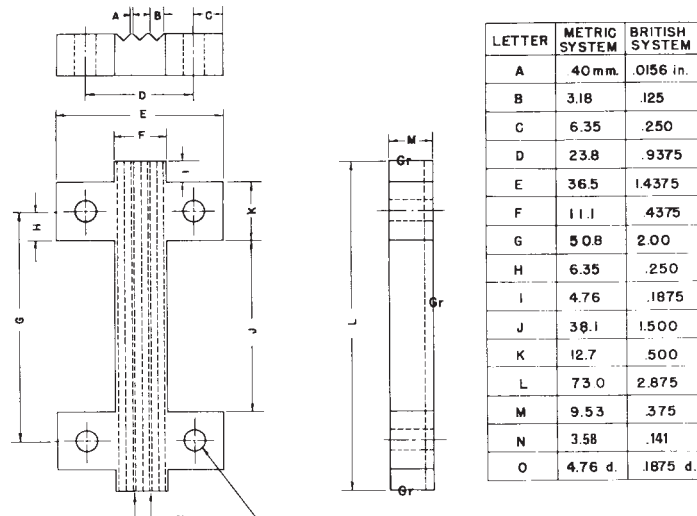
6.7 Reinforced Plastics, Including High-Strength Composites and High-Strength Composites and Highly Orthotropic Laminates—The following specimens shall be used for reinforced materials, or for other materials when necessary to comply with the slenderness ratio requirements or to permit attachment of a deformation-measuring device.

6.7.1 For materials 3.2 mm (1/8 in.) and over in thickness, a specimen shall consist of a prism having a cross section of 12.7 mm (1/2 in.) by the thickness of the material and a length such that the slenderness ratio is in the range from 11 to 16:1 (Note 5).

6.7.2 For materials under 3.2 mm (1/8 in.) thick, or where elastic modulus testing is required and the slenderness ratio does not provide for enough length for attachment of a compressometer or similar device, a specimen conforming to that shown in Fig. 5 shall be used. The supporting jig shown in Fig. 3 and Fig. 4 shall be used to support the specimen during testing (Note 6).

NOTE 5—If failure for materials in the thickness range of 3.2 mm (1/8 in.) is by delamination rather than by the desirable shear plane fracture, the material may be tested in accordance with 6.7.2.

NOTE 6—Round-robin tests have established that relatively satisfactory measurements of modulus of elasticity may be obtained by applying a compressometer to the edges of the jig-supported specimen.



NOTE 1—Cold rolled steel.
 NOTE 2—Furnished four steel machine screws and nuts, round head, slotted, length 31.75 mm (1¼ in.).
 NOTE 3—Grind surfaces denoted “Gr.”

FIG. 4 Support Jig, Details

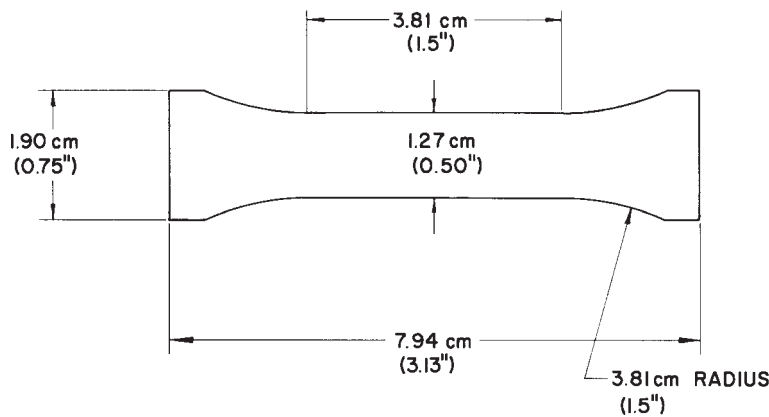


FIG. 5 Compression Test Specimen for Materials Less than 3.2 mm Thick

6.8 When testing syntactic foam, the standard test specimen shall be in the form of a right cylinder 25.4 mm (1 in.) in diameter by 50.8 mm (2 in.) in length.

7. Conditioning

7.1 *Conditioning*—Condition the test specimens at 23 ± 2°C (73.4 ± 3.6°F) and 50 ± 5 % relative humidity for not less than 40 h prior to test in accordance with Procedure A of Practice D 618 unless otherwise specified by contract or relevant ASTM material specification. Reference pre-test conditioning, to settle disagreements, shall apply tolerances of ±1°C (1.8°F) and ±2 % relative humidity.

7.1.1 Note that for some hygroscopic materials, such as nylons, the material specifications (for example, Classification System D 4066) call for testing “dry as-molded specimens.” Such requirements take precedence over the above routine preconditioning to 50 % RH and require sealing the specimens in water vapor-impermeable containers as soon as molded and not removing them until ready for testing.

7.2 *Test Conditions*—Conduct the tests at 23 ± 2°C (73.4 ± 3.6°F) and 50 ± 5 % relative humidity unless otherwise

specified by contract or the relevant ASTM material specification. Reference testing conditions, to settle disagreements, shall apply tolerances of ±1°C (1.8°F) and ±2 % relative humidity.

8. Number of Test Specimens

8.1 At least five specimens shall be tested for each sample in the case of isotropic materials.

8.2 Ten specimens, five normal to and five parallel with the principal axis of anisotropy, shall be tested for each sample in the case of anisotropic materials.

8.3 Specimens that break at some obvious flaw shall be discarded and retests made, unless such flaws constitute a variable, the effect of which it is desired to study.

9. Speed of Testing

9.1 Speed of testing shall be the relative rate of motion of the grips or test fixtures during the test. Rate of motion of the driven grip or fixture when the machine is running idle may be used if it can be shown that the resulting speed of testing is within the limits of variation allowed.

9.2 The standard speed of testing shall be 1.3 ± 0.3 mm (0.050 \pm 0.010 in.)/min, except as noted in 10.5.4.

10. Procedure

10.1 Measure the width and thickness of the specimen to the nearest 0.01 mm (0.001 in.) at several points along its length. Calculate and record the minimum value of the cross-sectional area. Measure the length of the specimen and record the value.

10.2 Place the test specimen between the surfaces of the compression tool, taking care to align the center line of its long axis with the center line of the plunger and to ensure that the ends of the specimen are parallel with the surface of the compression tool. Adjust the crosshead of the testing machine until it just contacts the top of the compression tool plunger.

NOTE 7—The compression tool may not be necessary for testing of lower modulus (for example, 700 MPa to 3500 MPa (100 000 psi to 500 000 psi)) material if the loading surfaces are maintained smooth, flat, and parallel to the extent that buckling is not incurred.

10.3 Place thin specimens in the jig (Fig. 3 and Fig. 4) so that they are flush with the base and centered (Note 8). The nuts or screws on the jig shall be finger tight (Note 9). Place the assembly in the compression tool as described in 5.3.

NOTE 8—A round-robin test, designed to assess the influence of specimen positioning in the supporting jig (that is, flush versus centered mounting), showed no significant effect on compressive strength due to this variable. However, flush mounting of the specimen with the base of the jig is specified for convenience and ease of mounting.⁸

NOTE 9—A round-robin test on the effect of lateral pressure at the supporting jig has established that reproducible data can be obtained with the tightness of the jig controlled as indicated.

10.4 If only compressive strength or compressive yield strength, or both, are desired, proceed as follows:

10.4.1 Set the speed control at 1.3 mm/min (0.050 in./min) and start the machine.

10.4.2 Record the maximum load carried by the specimen during the test (usually this will be the load at the moment of rupture).

10.5 If stress-strain data are desired, proceed as follows:

10.5.1 Attach compressometer.

10.5.2 Set the speed control at 1.3 mm/min (0.050 in./min) and start the machine.

10.5.3 Record loads and corresponding compressive strain at appropriate intervals of strain or, if the test machine is equipped with an automatic recording device, record the complete load-deformation curve.

10.5.4 After the yield point has been reached, it may be desirable to increase the speed from 5 to 6 mm/min (0.20 to 0.25 in./min) and allow the machine to run at this speed until the specimen breaks. This may be done only with relatively ductile materials and on a machine with a weighing system with response rapid enough to produce accurate results.

11. Calculation

11.1 *Compressive Strength*—Calculate the compressive strength by dividing the maximum compressive load carried by

the specimen during the test by the original minimum cross-sectional area of the specimen. Express the result in megapascals or pounds-force per square inch and report to three significant figures.

11.2 *Compressive Yield Strength*—Calculate the compressive yield strength by dividing the load carried by the specimen at the yield point by the original minimum cross-sectional area of the specimen. Express the result in megapascals or pounds-force per square inch and report to three significant figures.

11.3 *Offset Yield Strength*—Calculate the offset yield strength by the method referred to in 3.2.11.

11.4 *Modulus of Elasticity*—Calculate the modulus of elasticity by drawing a tangent to the initial linear portion of the load deformation curve, selecting any point on this straight line portion, and dividing the compressive stress represented by this point by the corresponding strain, measure from the point where the extended tangent line intersects the strain-axis. Express the result in gigapascals or pounds-force per square inch and report to three significant figures (see Annex A1).

11.5 For each series of tests, calculate to three significant figures the arithmetic mean of all values obtained and report as the “average value” for the particular property in question.

11.6 Calculate the standard deviation (estimated) as follows and report to two significant figures:

$$s = \sqrt{(\sum X^2 - n\bar{X}^2)/(n - 1)} \quad (1)$$

where:

s = estimated standard deviation,

X = value of single observation,

n = number of observations, and

\bar{X} = arithmetic mean of the set of observations.

NOTE 10—The method for determining the offset compressive yield strength is similar to that described in the Annex of Test Method D 638.

12. Report

12.1 Report the following information:

12.1.1 Complete identification of the material tested, including type, source, manufacturer’s code number, form, principal dimensions, previous history, etc.,

12.1.2 Method of preparing test specimens,

12.1.3 Type of test specimen and dimensions,

12.1.4 Conditioning procedure used,

12.1.5 Atmospheric conditions in test room,

12.1.6 Number of specimens tested,

12.1.7 Speed of testing,

12.1.8 Compressive strength, average value, and standard deviation,

12.1.9 Compressive yield strength and offset yield strength average value, and standard deviation, when of interest,

12.1.10 Modulus of elasticity in compression (if required), average value, standard deviation,

12.1.11 Date of test, and

12.1.12 Date of test method.

⁸ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR: D20-1061.

13. Precision and Bias⁹

13.1 Table 1 and Table 2 are based on a round-robin test

TABLE 1 Precision, Compressive Strength
(Values in Units of Megapascals)

Material	Average	S_r^A	S_R^B	r^C	R^D
Acetal	100	1.1	2.1	3.1	5.9
Polystyrene	106	1.4	3.5	3.9	9.8
Linen-filled phenolic	158	3.7	7.5	10.4	21.0

^A S_r is the within-laboratory standard deviation for the indicated material. It is obtained by pooling the within-laboratory standard deviations of the test results from all of the participating laboratories:

$$S_r = [((S_1)^2 + (S_2)^2 + \dots + (S_n)^2)/n]^{1/2}$$

^B S_R is the between-laboratories reproducibility, expressed as a standard deviation, for the indicated material.

^C r is the within-laboratory repeatability limit, $r = 2.8 \times S_r$.

^D R is the between-laboratory reproducibility limit, $R = 2.8 \times S_R$.

TABLE 2 Precision, Compressive Modulus
(Values in Units of Megapascals)

Material	Average	S_r^A	S_R^B	r^C	R^D
Acetal	3.28	0.14	0.25	0.39	0.70
Polystyrene	3.88	0.07	0.74	0.20	2.07
Linen-filled phenolic	6.82	0.23	0.90	0.64	2.52

^A S_r is the within-laboratory standard deviation for the indicated material. It is obtained by pooling the within-laboratory standard deviations of the test results from all of the participating laboratories:

$$S_r = [((S_1)^2 + (S_2)^2 + \dots + (S_n)^2)/n]^{1/2}$$

^B S_R is the between-laboratories reproducibility, expressed as a standard deviation, for the indicated material.

^C r is the within-laboratory repeatability limit, $r = 2.8 \times S_r$.

^D R is the between-laboratory reproducibility limit, $R = 2.8 \times S_R$.

conducted in 1987 in accordance with Practice E 691, involving three materials tested by six laboratories for Test Method D 695M. Since the test parameters overlap within tolerances and the test values are normalized, the same data are used for both test methods. For each material, all of the samples were

⁹ Supporting data are available from ASTM Headquarters, Request RR: D20-1150.

prepared at one source. Each test result was the average of five individual determinations. Each laboratory obtained two test results for each material.

NOTE 11—**Caution:** The following explanations of r and R (13.2-13.2.3) are only intended to present a meaningful way of considering the approximate precision of this test method. The data in Table 1 and Table 2 should not be rigorously applied to acceptance or rejection of material, as these data apply only to the materials tested in the round robin and are unlikely to be rigorously representative of other lots, formulations, conditions, materials, or laboratories. Users of this test method should apply the principles outlined in Practice E 691 to generate data specific to their laboratory and materials or between specific laboratories. The principles of 13.2-13.2.3 would then be valid for such data.

13.2 *Concept of r and R in Table 1 and Table 2*—If $S(r)$ and $S(R)$ have been calculated from a large enough body of data, and for test results that were averages from testing of five specimens for each test result, then:

13.2.1 *Repeatability*—Two test results obtained within one laboratory shall be judged not equivalent if they differ by more than the “ r ” for that the material. “ r ” is the interval representing the critical difference between two test results for the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day in the same laboratory.

13.2.2 *Reproducibility, R*—Two test results obtained by different laboratories shall be judged not equivalent if they differ by more than the “ R ” value for that material. “ R ” is the interval representing the critical difference between the two test results for the same material, obtained by different operators using different equipment in different laboratories.

13.2.3 Any judgement in accordance with 13.2.1 and 13.2.2 would have an approximate 95 % (0.95) probability of being correct.

13.3 There are no recognized standards by which to estimate the bias of this test method.

14. Keywords

14.1 compressive properties; compressive strength; modulus of elasticity; plastics

ANNEX

(Mandatory Information)

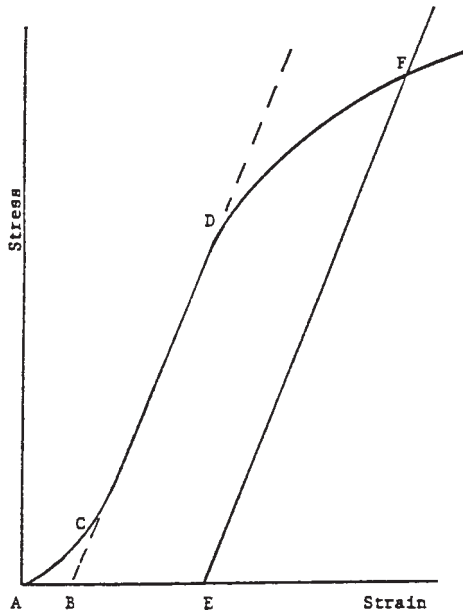
A1. TOE COMPENSATION

A1.1 In a typical stress-strain curve (Fig. A1.1) there is a toe region, AC , that does not represent a property of the material. It is an artifact caused by a takeup of slack, and alignment or seating of the specimen. In order to obtain correct values of such parameters as modulus, strain, and offset yield point, this artifact must be compensated for to give the corrected zero point on the strain or extension axis.

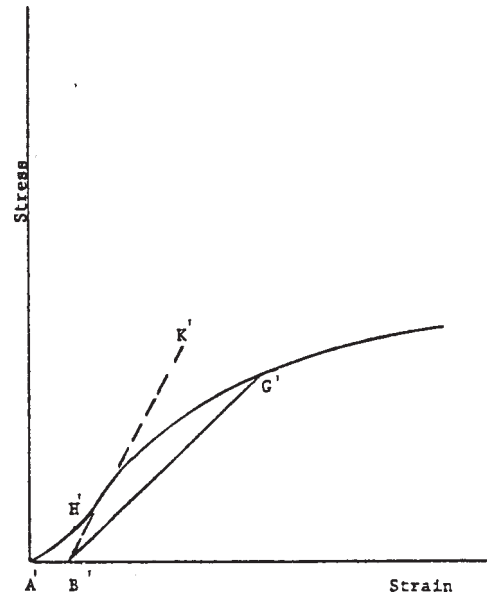
A1.2 In the case of a material exhibiting a region of Hookean (linear) behavior (Fig. A1.1), a continuation of the linear (CD) region of the curve is constructed through the zero-stress axis. This intersection (B) is the corrected zero-strain point from which all extensions or strains must be

measured, including the yield offset (BE), if applicable. The elastic modulus can be determined by dividing the stress at any point along the line CD (or its extension) by the strain at the same point (measured from Point B , defined as zero-strain).

A1.3 In the case of a material that does not exhibit any linear region (Fig. A1.2), the same kind of toe correction of the zero-strain point can be made by constructing a tangent to the maximum slope at the inflection point (H'). This is extended to intersect the strain axis at Point B' , the corrected zero-strain point. Using Point B' as zero strain, the stress at any point (G') on the curve can be divided by the strain at that point to obtain a secant modulus (slope of line $B'G'$). For those materials with



NOTE 1—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.
FIG. A1.1 Material with Hookean Region



NOTE 1—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.
FIG. A1.2 Material with No Hookean Region

no linear region, any attempt to use the tangent through the inflection point as a basis for determination of an offset yield point may result in unacceptable error.

SUMMARY OF CHANGES

This section identifies the location of selected changes to this test method. For the convenience of the user, Committee D20 has highlighted those changes that may impact the use of this test method. This section may also include descriptions of the changes or reasons for the changes, or both.

D695–02a:

- (1) Added Terminology D 883.
- (2) Added Test Methods D 5947.
- (3) Added 3.1, adjusted numbering throughout Section 3.
- (4) Changed reference in 3.2.8 from 3.11 to 3.2.11.
- (5) Deleted last sentence of 4.1.
- (6) Added last sentence to 4.4.

- (7) Reworded 5.1.1 to improve readability
- (8) Changed “fortuitous flow” to “flaw” in 8.3.
- (9) Reworded Note 11, 13.2, 13.2.1, and 13.2.2 to be in accordance with Guide D 4968.
- (10) Corrected the title of Fig. 3.

D695–02:

- (1) Revised 7.1 and 7.2.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



ANEXO D.-

IS 13360 (Part 5/Sec 8) : 2013
ISO 604 : 2002

भारतीय मानक
प्लास्टिक — परीक्षण पद्धतियाँ
भाग 5 यांत्रिक गुणधर्म
अनुभाग 8 संपीडन गुणधर्म ज्ञात करना
(पहला पुनरीक्षण)

Indian Standard
PLASTICS — METHODS OF TESTING
PART 5 MECHANICAL PROPERTIES
Section 8 Determination of Compressive Properties
(*First Revision*)

ICS 83.080.01

© BIS 2013

BUREAU OF INDIAN STANDARDS
MANAK BHAVAN, 9 BAHADUR SHAH ZAFAR MARG
NEW DELHI 110002

June 2013

Price Group 8

NATIONAL FOREWORD

This Indian Standard (Part 5/Sec 8) (First Revision) which is identical with ISO 604 : 2002 'Plastics — Determination of compressive properties' issued by the International Organization for Standardization (ISO) was adopted by the Bureau of Indian Standards on the recommendation of the Plastics Sectional Committee and approval of the Petroleum, Coal and Related Products Division Council.

This standard was originally published in 1996 which was identical with ISO 604 : 1993. The first revision of this standard has been undertaken to align it with the latest version of ISO 604 : 2002.

The text of ISO Standard has been approved as suitable for publication as an Indian Standard without deviations. Certain conventions are, however, not identical to those used in Indian Standards. Attention is particularly drawn to the following:

- a) Wherever the words 'International Standard' appear referring to this standard, they should be read as 'Indian Standard'.
- b) Comma (,) has been used as a decimal marker while in Indian Standards, the current practice is to use a point (.) as the decimal marker.

In this adopted standard, reference appears to the following International Standards for which Indian Standards also exist. The corresponding Indian Standards which are to be substituted in their respective places are listed below along with their degree of equivalence for the editions indicated:

<i>International Standard</i>	<i>Corresponding Indian Standard</i>	<i>Degree of Equivalence</i>
ISO 291 : 1997 ¹⁾ Plastics — Standard atmospheres for conditioning and testing	IS 196 : 1966 Atmospheric conditions for testing (<i>revised</i>)	Technically Equivalent
ISO 293 : 2004 Plastics — Compression moulding test specimens of thermoplastic materials	IS 13360 (Part 2/Sec 1) ²⁾ Plastics — Methods of testing: Part 2 Sampling and preparation of test specimens, Section 1 Compression moulding test specimens of thermoplastic materials (<i>first revision</i>)	Identical
ISO 294-1 : 1996 Plastics — Injection moulding of test specimens of thermoplastic materials — Part 1: General principles, and moulding of multipurpose and bar test specimens	IS 13360 (Part 2/Sec 3) : 2000 Plastics — Methods of testing: Part 2 Sampling and preparation of test specimens, Section 3 Injection moulding of test specimens of thermoplastic materials — General principles and moulding of multipurpose and bar test specimens	do
ISO 295 : 2004 Plastics — Compression moulding of test specimens of thermosetting materials	IS 13360 (Part 2/Sec 2) : 2013 Plastics — Methods of testing: Part 2 Sampling and preparation of test specimens, Section 2 Compression moulding of test specimens of thermosetting materials (<i>first revision</i>)	do

¹⁾ Since revised in 2008.

²⁾ Under print.

Indian Standard
PLASTICS — METHODS OF TESTING
PART 5 MECHANICAL PROPERTIES
Section 8 Determination of Compressive Properties
(First Revision)

1 Scope

This International Standard specifies a method for determining the compressive properties of plastics under defined conditions. A standard test specimen is defined but its length may be adjusted to prevent buckling under load from affecting the results. A range of test speeds is included.

The method is used to investigate the compressive behaviour of the test specimens and for determining the compressive strength, compressive modulus and other aspects of the compressive stress/strain relationship under the conditions defined.

The method applies to the following range of materials:

- rigid and semi-rigid^[1] thermoplastic moulding and extrusion materials, including compounds filled and reinforced by e.g. short fibres, small rods, plates or granules in addition to unfilled types; rigid and semi-rigid thermoplastic sheet;
- rigid and semi-rigid thermoset moulding materials, including filled and reinforced compounds; rigid and semi-rigid thermoset sheet;
- thermotropic liquid-crystal polymers.

In agreement with ISO 10350-1 and ISO 10350-2, this International Standard applies to fibre-reinforced compounds with fibre lengths $\leq 7,5$ mm prior to processing.

The method is not normally suitable for use with materials reinforced by textile fibres (see references [2] and [5]), fibre-reinforced plastic composites and laminates (see [5]), rigid cellular materials (see [3]) or sandwich structures containing cellular material or rubber (see [4]).

The method is performed using specimens which may be moulded to the chosen dimensions, machined from the central portion of a standard multipurpose test specimen (see ISO 3167) or machined from finished or semi-finished products such as mouldings or extruded or cast sheet.

The method specifies preferred dimensions for the test specimen. Tests which are carried out on specimens of different dimensions, or on specimens which are prepared under different conditions, may produce results which are not comparable. Other factors, such as the test speed and the conditioning of the specimens, can also influence the results. Consequently, when comparable data are required, these factors must be carefully controlled and recorded.

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. For dated references, subsequent amendments to, or revisions of, any of these publications do not apply. However, parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. For undated references, the latest edition of the normative document referred to applies. Members of ISO and IEC maintain registers of currently valid International Standards.

ISO 291:1997, *Plastics — Standard atmospheres for conditioning and testing*

ISO 293:1986, *Plastics — Compression moulding test specimens of thermoplastic materials*

ISO 294-1:1996, *Plastics — Injection moulding of test specimens of thermoplastic materials — Part 1: General principles, and moulding of multipurpose and bar test specimens*

ISO 295:—¹⁾, *Plastics — Compression moulding of test specimens of thermosetting materials*

ISO 2602:1980, *Statistical interpretation of test results — Estimation of the mean — Confidence interval*

ISO 2818:1994, *Plastics — Preparation of test specimens by machining*

ISO 3167:—²⁾, *Plastics — Multipurpose test specimens*

ISO 5893:—³⁾, *Rubber and plastics test equipment — Tensile, flexural and compression types (constant rate of traverse) — Specification*

ISO 10724-1:1998, *Plastics — Injection moulding of test specimens of thermosetting powder moulding compounds (PMCs) — Part 1: General principles and moulding of multipurpose test specimens*

3 Terms and definitions

For the purposes of this International Standard, the following terms and definitions apply (see also Figure 1).

3.1 gauge length

L_0

initial distance between the gauge marks on the central part of the test specimen

NOTE It is expressed in millimetres (mm).

3.2 test speed

v

rate of approach of the plates of the test machine during the test

NOTE It is expressed in millimetres per minute (mm/min).

3.3 compressive stress

σ

compressive load, per unit area of original cross-section, carried by the test specimen

NOTE 1 It is expressed in megapascals (MPa).

1) To be published. (Revision of ISO 295:1991)

2) To be published. (Revision of ISO 3167:1993)

3) To be published. (Revision of ISO 5893:1993)

NOTE 2 In compression tests, the stresses σ and strains ε are negative. The negative sign, however, is generally omitted. If this generates confusion, e.g. in comparing tensile and compressive properties, the negative sign may be added for the latter. This is unnecessary for the nominal compressive strain ε_c .

3.3.1 compressive stress at yield

σ_y
first stress at which an increase in strain (see 3.4) occurs without an increase in stress (see Figure 1, curve a, and note 2 to 3.3)

NOTE 1 It is expressed in megapascals (MPa).

NOTE 2 It may be less than the maximum attainable stress.

3.3.2 compressive strength

σ_M
maximum compressive stress sustained by the test specimen during a compressive test (see Figure 1 and note 2 to 3.3)

NOTE It is expressed in megapascals (MPa).

3.3.3 compressive stress at break (rupture)

σ_B
compressive stress at break of the test specimen (see Figure 1 and note 2 to 3.3)

NOTE It is expressed in megapascals (MPa).

3.3.4 compressive stress at x % strain

σ_x
stress at which the strain reaches a specified value x % (see 3.5)

NOTE 1 It is expressed in megapascals (MPa).

NOTE 2 The compressive stress at x % strain may be measured, e.g., if the stress/strain curve does not exhibit a yield point (see Figure 1, curve b, and note 2 to 3.3). In this case, x is taken from the relevant product standard or agreed upon by the interested parties. In any case, x will have to be lower than the strain at compressive strength.

3.4 compressive strain

ε
decrease in length per unit original gauge length L_0 [see 10.2, equation (6), and note 2 to 3.3]

NOTE It is expressed as a dimensionless ratio or percentage (%).

3.5 nominal compressive strain

ε_c
decrease in length per unit original length L of the test specimen [see 10.2, equation (8)]

NOTE It is expressed as a dimensionless ratio or percentage (%).

3.5.1 nominal compressive yield strain

ε_{cy}
strain corresponding to the compressive stress at yield σ_y (see 3.3.1)

NOTE It is expressed as a dimensionless ratio or percentage (%).

3.5.2
nominal compressive strain at compressive strength

ϵ_{cM}
 strain corresponding to the compressive strength σ_M (see 3.3.2)

NOTE It is expressed as a dimensionless ratio or percentage (%).

3.5.3
nominal compressive strain at break

ϵ_{cB}
 strain at break of the test specimen

NOTE It is expressed as a dimensionless ratio or percentage (%).

3.6
compressive modulus

E_c
 ratio of the stress difference ($\sigma_2 - \sigma_1$) to the corresponding strain difference values ($\epsilon_2 = 0,0025$ minus $\epsilon_1 = 0,0005$) [see 10.3, equation (9)]

NOTE 1 It is expressed in megapascals (MPa).

NOTE 2 The compression modulus is calculated on the basis of the compressive strain ϵ only (see 3.4).

NOTE 3 With computer-aided equipment, the determination of the modulus E_c using two distinct stress/strain points may be replaced by a linear regression procedure applied to the part of the curve between these points.

4 Principle

The test specimen is compressed along its major axis at constant speed until the specimen fractures or until the load or the decrease in length reaches a predetermined value. The load sustained by the specimen is measured during this procedure.

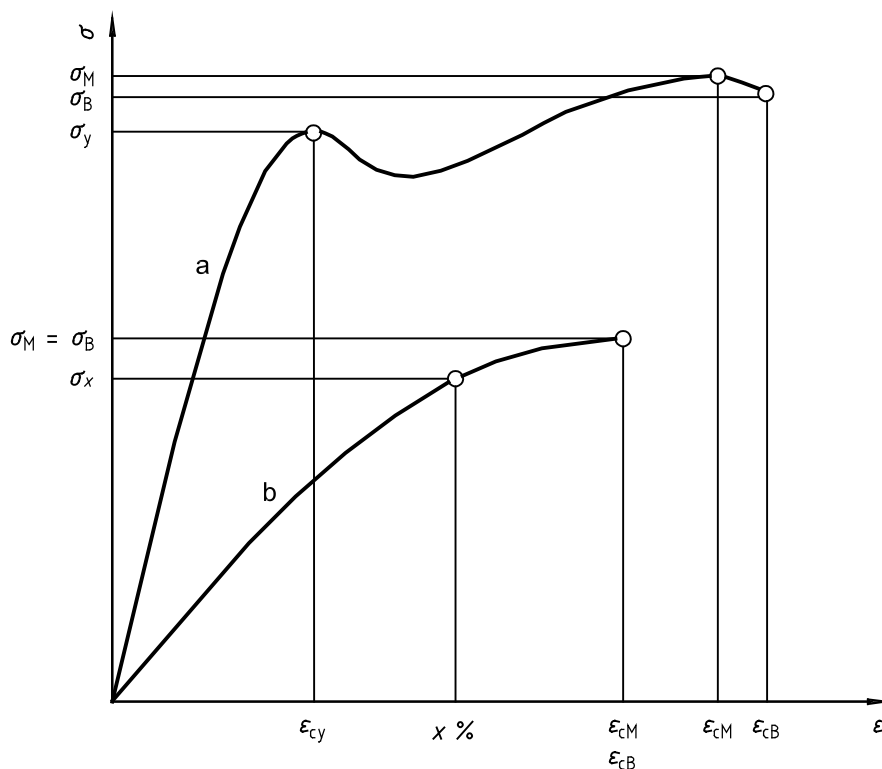


Figure 1 — Typical stress/strain curves

5 Apparatus

5.1 Test machine

5.1.1 General

The test machine shall comply with ISO 5893, and meet the specifications given in 5.1.2 to 5.1.5, as follows.

5.1.2 Test speeds

The machine shall be capable of maintaining the test speeds as specified in Table 1. If other speeds are used, the machine shall be capable of maintaining the speed to a tolerance of $\pm 20\%$ for speeds less than 20 mm/min and $\pm 10\%$ for speeds greater than 20 mm/min.

Table 1 — Recommended test speeds

Test speed v mm/min	Tolerance %
1	± 20
2	± 20
5	± 20
10	± 20
20	$\pm 10^a$

^a This tolerance is smaller than that indicated in ISO 5893.

Acceleration, seating and machine compliance may contribute to a curved region at the start of the stress/strain curve. This can be avoided as explained in 9.4 and 9.6.

5.1.3 Compression tool

Hardened-steel compression plates shall be used to apply the deformation load to the test specimen, so constructed that the load sustained by the specimen is axial to within 1:1 000 and is transmitted through polished surfaces which are flat to within 0,025 mm, parallel to each other and perpendicular to the loading axis.

NOTE A self-aligning device may be used where required.

5.1.4 Load indicator

The load indicator shall incorporate a mechanism capable of showing the total compressive force sustained by the test specimen. The mechanism shall be essentially free of inertia lag at the specified test speed and shall indicate the value of the load with an accuracy of $\pm 1\%$, or better, of the relevant value.

NOTE Systems have become commercially available that use ring-shaped strain gauges, and thus any lateral forces which may be generated by misalignment of the test set-up are compensated for (see 9.3).

5.1.5 Extensometer

The extensometer shall incorporate a mechanism suitable for determining the relative change in length of the appropriate part of the test specimen. If compressive strain ε is to be measured (the preferred approach), then this length is the gauge length; otherwise, for nominal compressive strain ε_c , it is the distance between the contact surfaces of the compression tool. It is desirable, but not essential, that this instrument automatically records this distance.

The instrument shall be essentially free of inertia lag at the specified test speed. For modulus determination using a type A specimen, it shall be accurate to $\pm 1\%$, or better, of the strain interval used. This corresponds to $\pm 1\ \mu\text{m}$ for the measurement of the compressive modulus, based on a gauge length of 50 mm and a strain interval of 0,2 %.

When the extensometer is attached to the test specimen, care shall be taken to ensure that any distortion or damage to the test specimen is minimal. It is also essential that there is no slippage between the extensometer and the test specimen.

The specimens may also be instrumented with longitudinal strain gauges, the accuracy of which shall be 1 %, or better, of the strain interval used. This corresponds to a strain accuracy of $2,0 \times 10^{-5}$ for the measurement of the modulus. The gauges, the specimen surface preparation method and the bonding agents used shall be chosen to ensure adequate performance with the material under test.

NOTE Slight misalignment and initial warpage of the test specimen may generate differences in strain between the opposite surfaces of the specimen, resulting in errors at low strains. In these cases, the use of strain-measuring methods that average the strain on the two opposite sides of the specimen may be used. However, the use of strain gauges on either side of the specimen, with independent data collection, will detect buckling and bending much more rapidly than will devices that average the strain on the opposite surfaces.

5.2 Devices for measuring the dimensions of the test specimens

5.2.1 Rigid materials

Use a micrometer, or equivalent, reading to 0,01 mm or better, to measure the thickness, width and length.

The dimensions and shape of the anvils shall be suitable for the specimens being tested and shall not exert a force on the specimen such as to detectably alter the dimension being measured.

5.2.2 Semi-rigid materials

Micrometer, or equivalent, reading to 0,01 mm or better and provided with a flat circular foot which applies a pressure of $20\ \text{kPa} \pm 3\ \text{kPa}$, to measure the thickness.

6 Test specimens

6.1 Shape and dimensions

6.1.1 General

Test specimens shall be in the shape of a right prism, cylinder or tube.

The dimensions of the test specimens shall be such that the following inequality is satisfied (see also annex B):

$$\varepsilon_c^* \leq 0,4 \frac{x^2}{l^2} \quad (1)$$

where

ε_c^* is the maximum nominal compressive strain, expressed as a dimensionless ratio, which occurs during the test;

l is the length of the specimen, measured parallel to the axis of the compressive force;

x is the diameter of the cylinder, the outer diameter of the tube or the thickness (the shortest side of the cross-section) of the prism, depending on the shape of the test specimen.

NOTE 1 For measurement of the compressive modulus E_c as defined in 3.6, a value of the dimensionless ratio x/l of $>0,08$ is recommended.

NOTE 2 When carrying out compression tests in general, a value of the dimensionless ratio x/l of $\geq 0,4$ is recommended. This corresponds to a maximum compressive strain of about 6 %.

Equation (1) is based upon the linear stress/strain behaviour of the material under test. Values of ϵ_c^* two to three times higher than the maximum strain used in the test shall be chosen with increasing compressive strain and ductility of the material.

6.1.2 Preferred test specimens

The preferred dimensions for test specimens are given in Table 2.

Table 2 — Dimensions of preferred specimen types

Dimensions in millimetres				
Type	Measurement	Length, l	Width, b	Thickness, h
A	Modulus	50 ± 2	$10 \pm 0,2$	$4 \pm 0,2$
B	Strength	$10 \pm 0,2$		

The specimens should preferably be cut from a multipurpose test specimen (see ISO 3167).

NOTE Annex A details two types of small test specimen for use when, owing to lack of material or because of geometric constraints on a product, the preferred specimen types cannot be used.

6.2 Preparation

6.2.1 Moulding and extrusion compounds

Specimens shall be prepared in accordance with the relevant material specification. When none exists, and unless otherwise agreed by the interested parties, specimens shall be either directly compression moulded or directly injection moulded from the material in accordance with ISO 293, ISO 294-1, ISO 295 or ISO 10724-1, as appropriate.

6.2.2 Sheets

Specimens shall be machined from sheets in accordance with ISO 2818.

6.2.3 Machining

All machining operations shall be carried out carefully so that smooth surfaces result. Great care shall be taken in machining the ends so that smooth, flat, parallel surfaces and sharp, clean edges, perpendicular to the longest axis of the specimen to within 0,025 mm, result.

It is recommended that the end surfaces of the test specimen be machined with a lathe or a milling machine.

6.2.4 Gauge marks

If optical equipment is used to measure the change in length, it is necessary to put gauge marks on the specimen to define the gauge length. These shall be approximately equidistant from the midpoint of the test specimen, and the distance between the marks shall be measured to an accuracy of 1 % or better.

Gauge marks shall not be scratched, punched or impressed upon the test specimen in any way which causes damage to the material being tested. It shall be ensured that the marking medium has no detrimental effect on the material being tested and that they are as narrow as possible.

6.3 Specimen inspection

The specimens shall be free of twist. The surfaces and edges shall be free from scratches, pits, sink marks, flash and other visible imperfections that are likely to influence the results. The surfaces facing the compression plates shall be parallel and at right angles to the longitudinal direction.

The specimens shall be checked for conformity with these requirements by visual observation against straight edges, squares and flat plates, and by measuring with micrometer calipers.

Specimens showing measurable or observable departure from one or more of these requirements shall be rejected or machined to proper size and shape before testing.

NOTE Injection-moulded test specimens usually have draft angles of between 1° and 2° to facilitate demoulding. Therefore side faces of moulded test specimens will generally not be parallel.

6.4 Anisotropic materials

6.4.1 In the case of anisotropic materials, the test specimens shall be chosen so that the compressive stress will be applied in the test procedure in the same or a similar direction to that experienced by the products (moulded articles, sheet, tubes, etc.) during service in the intended application, if known.

6.4.2 The relationship between the dimensions of the test specimen and the size of the product will determine the possibility of using preferred test specimens. If the use of one of the preferred test specimens is impossible, the size of the product will govern the choice of the dimensions of the test specimens as well as 6.1. It should be noted that the orientation and dimensions of the test specimens sometimes have a very significant influence on the test results.

6.4.3 When the material shows a significant difference in compressive properties in two principal directions, it shall be tested in these two directions. If, because of its intended application, the material will be subjected to compressive stress at some specific orientation other than one of the principal directions, it is desirable to test the material in that orientation.

The orientation of the test specimens relative to the principal directions shall be recorded.

7 Number of test specimens

7.1 Test at least five specimens for each sample in the case of isotropic materials.

7.2 Test at least ten specimens, five normal to and five parallel to the principal axis of anisotropy, for each sample in the case of anisotropic materials.

7.3 Specimens that break at some obvious flaw shall be discarded and replacement specimens tested.

8 Conditioning of test specimens

The test specimens shall be conditioned in accordance with the requirements of the International Standard for the material. In the absence of such requirements, use the most appropriate conditions given in ISO 291, unless otherwise agreed between the interested parties.

The preferred set of conditions is atmosphere 23/50, except when the compressive properties of the material are known to be insensitive to moisture, in which case humidity control is unnecessary.

9 Test procedure

9.1 Test atmosphere

Perform the test in one of the standard atmospheres specified in ISO 291, preferably the same atmosphere as used for conditioning.

9.2 Measurement of test specimen dimensions

Measure the width and thickness, or the diameters, of the test specimen at three points along its length and calculate the mean value of the cross-sectional area.

Measure the length of each test specimen to 1 % accuracy.

9.3 Set up

Place the test specimen between the surfaces of the compression plates and align the centrelines of the compression plate surfaces. Ensure that the end surfaces of the specimen are parallel to the surfaces of the compression plates and adjust the machine so that the surfaces of the ends of the test specimen are just touching the compression plates.

During compression, the end surfaces of the test specimen may slip along the compression plates to varying extents, depending upon the surface textures of the specimen and plates. This will lead to varying degrees of barrel distortion, which in turn may influence the values of the properties measured. The less rigid the material, the more pronounced the effect.

For the most precise measurements, it is recommended that either the end surfaces be treated with an appropriate lubricant to promote slip or that discs of fine abrasive paper be used between specimen and plates to inhibit slip. If either method is used, it shall be noted in the test report.

9.4 Preload

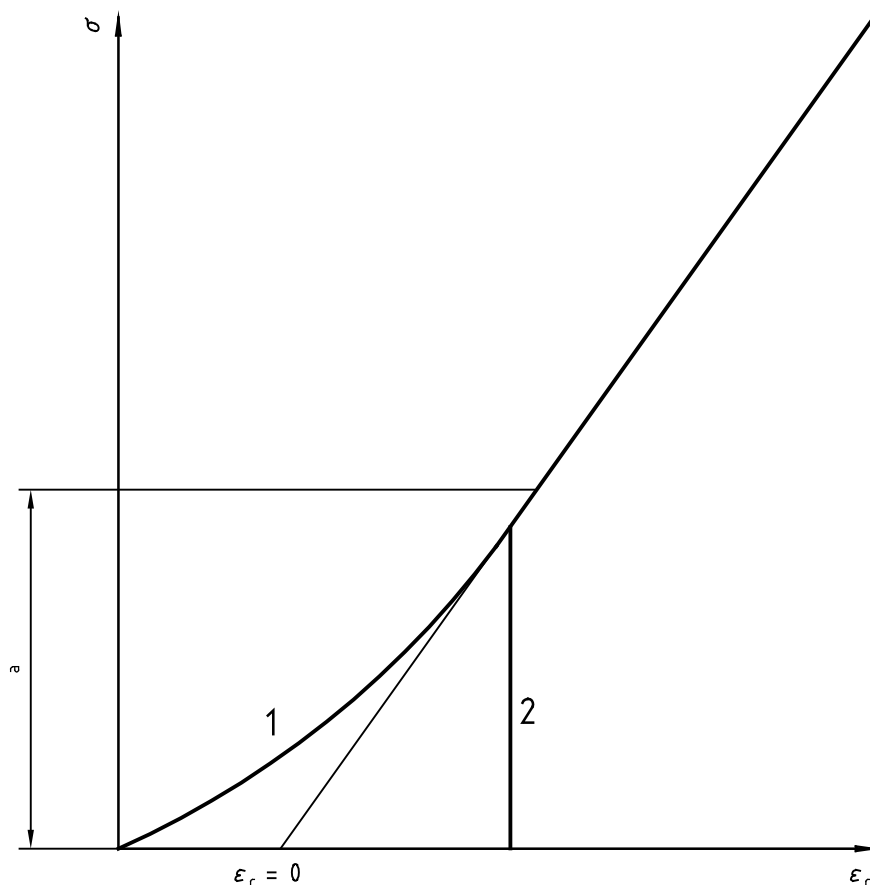
The specimen shall not be loaded substantially prior to the test. Such loads may be necessary, however, to avoid a curved region at the start of the stress/strain diagram. For modulus measurement, the compressive stress σ_0 at the start of a test (see Figure 2) shall lie within the range:

$$0 \leq \sigma_0 \leq 5 \times 10^{-4} E_c \quad (2)$$

which corresponds to a prestrain of $\varepsilon_{c0} \leq 0,05$ %, and when measuring characteristics such as σ_M it shall lie within the range:

$$0 \leq \sigma_0 \leq 10^{-2} \sigma_M \quad (3)$$

NOTE The compressive modulus of strongly viscoelastic, ductile materials like polyethylene, polypropylene or moist polyamides is influenced markedly by prestress.



Key

- 1 Initial part of stress/strain plot showing a curved region.
- 2 Initial part of stress/strain plot showing a step due to forces being measured only above a trigger threshold.

a $\leq 5 \times 10^{-4} E_C$ or $\leq 10^{-2} \sigma_M$

Figure 2 — Example of stress/strain curves with an initial curved region and with a step, and determination of zero-strain point

9.5 Test speed

Set the test speed v (see 3.2), in millimetres per minute, to the value specified by the material specification or, in the absence of this, to that of the values given in Table 1 which is the closest approximation to

- $v = 0,02l$ (l in millimetres) for modulus measurements;
- $v = 0,1l$ (l in millimetres) for strength measurements with materials which break prior to yielding;
- $v = 0,5l$ (l in millimetres) for strength measurements with materials which yield.

For the preferred test specimens (see 6.1.2), the test speeds are

- 1 mm/min for modulus measurements ($l = 50$ mm);
- 1 mm/min for strength measurements with materials which break prior to yielding ($l = 10$ mm);
- 5 mm/min for strength measurements with materials which yield ($l = 10$ mm).

9.6 Recording of data

Determine the force (stress) and the corresponding compression (strain) of the specimen during the test. It is preferable to use an automatic recording system which yields a complete stress/strain curve for this operation.

Determine all relevant stresses and strains defined in clause 3 from the stress/strain data recorded during the test.

If a curved region is found in the initial part of the stress/strain diagram, check that it does not extend beyond the prestress limit given in 9.4. See annex C for a method of compliance correction if compression was not measured directly on the test specimen.

10 Calculation and expression of results

10.1 Stress

Calculate the stress parameters defined in 3.3, using the following equation:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4)$$

where

σ is the stress parameter in question, expressed in megapascals;

F is the force measured, expressed in newtons;

A is the initial cross-sectional area of the specimen, expressed in square millimetres.

10.2 Strain

10.2.1 Strain (as measured by extensometry)

Calculate the strain parameters defined in 3.4, using the following equations:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (5)$$

$$\varepsilon \text{ (in \%)} = 100 \times \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (6)$$

where

ε is the strain parameter in question, expressed as a dimensionless ratio (equation 5) or as a percentage (equation 6);

L_0 is the gauge length of the test specimen, expressed in millimetres;

ΔL_0 is the decrease in the specimen length between the gauge marks, expressed in millimetres.

10.2.2 Nominal strain (as determined by crosshead travel)

Calculate the nominal-strain parameters defined in 3.5, using the following equations:

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta L}{L} \quad (7)$$

$$\varepsilon_c \text{ (in \%)} = 100 \times \frac{\Delta L}{L} \quad (8)$$

where

ε_c is the nominal strain in question, expressed as a dimensionless ratio (equation 7) or as a percentage (equation 8);

L is the initial distance between the compression plates, expressed in millimetres;

ΔL is the decrease in the distance between the compression plates.

If ΔL is not measured directly between the compression plates by a suitable displacement transducer, but by using e.g. the crosshead movement of the test machine, corrections for machine compliance shall be applied to the determination of ΔL (see annex C).

If a curved region is found in the initial part of the stress/strain diagram, extrapolate to zero strain from stresses slightly above the initial stress described in 9.4 (see Figure 2).

10.3 Compressive modulus

Calculate the compressive modulus, defined in 3.6, on the basis of two specified strain values determined in accordance with 10.2.1:

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (9)$$

where

E_c is the compressive modulus, expressed in megapascals;

σ_1 is the stress, in megapascals, measured at the value of the strain ε_1 of 0,000 5;

σ_2 is the stress, in megapascals, measured at the value of the strain ε_2 of 0,002 5.

With computer-aided equipment, the determination of the compressive modulus E_c using two distinct stress/strain points can be replaced by a linear regression procedure applied to the part of the curve between these points.

10.4 Statistical parameters

Calculate the arithmetic mean of each set of five test results and, if required, the standard deviation and 95 % confidence interval of the mean value by the procedure given in ISO 2602.

10.5 Significant figures

Calculate the stresses and the compressive modulus to three significant figures. Calculate the strains to two significant figures.

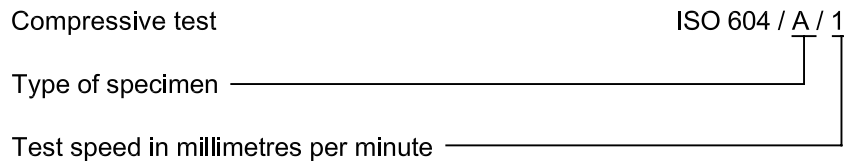
11 Precision

The precision of this test method is not known because interlaboratory data are not available. When interlaboratory data are obtained, a precision statement will be added at the following revision.

12 Test report

The test report shall include the following information:

- a) a reference to this International Standard, plus the type of specimen and the test speed, in accordance with the following scheme:



- b) all details necessary for complete identification of the material tested, including type, source, manufacturer's code number and history, where these are known;
- c) a description of the nature and form of the material under test, i.e. whether it is a product, semi-finished product, test plate or specimen, and including principal dimensions, shape, method of manufacture, order of layers, preliminary treatment, etc.;
- d) the specimen width, thickness and length, giving the mean, minimum and maximum values, if applicable;
- e) details of the method used to prepare the test specimens;
- f) if the material is in the form of a finished or semi-finished product, the orientation of the specimen in relation to the finished or semi-finished product from which it was cut;
- g) the number of specimens tested;
- h) the atmosphere used for conditioning and for testing, plus any special conditioning treatment carried out if required by the International Standard for the material or product;
- i) the accuracy grading of the test machine (see ISO 5893);
- j) the type of extensometer used;
- k) the type of compression tool used;
- l) whether or not slip promoters or slip inhibitors were used on the end surfaces;
- m) the individual test results determined for the compressive properties defined in clause 3;
- n) the mean value of each of the properties measured, quoted as the indicative value(s) for the material tested;
- o) (optional) the standard deviation and/or coefficient of variation and/or confidence limits of the mean;
- p) whether any test specimens were rejected and replaced and, if so, the reasons;
- q) the date of the test.

Annex A (normative)

Small test specimens

A.1 Test specimens as specified in clause 6 may be impossible to produce from the amount of material available or from a finished product. In these circumstances, use may be made of the small specimens described in this annex.

A.2 It must be expected that the results obtained with small specimens will differ from those obtained with normal-sized specimens.

A.3 The use of small specimens shall be agreed to by the interested parties, and specific reference to their use made in the test report.

A.4 The test shall be carried out in accordance with this International Standard as for normal test specimens, except as noted below.

The nominal dimensions of the specimens, in millimetres, shall be as specified in Table A.1.

Table A.1 — Nominal dimensions of small test specimens

Dimensions in millimetres		
Dimension	Type 1	Type 2
Thickness	3	3
Width	5	5
Length	6	35

The type 2 specimen shall only be used for determining compressive modulus; in this case the use of a 15 mm gauge length is recommended to facilitate the determination.

Annex B (informative)

Limits of buckling

According to Euler, the critical axial compressive force F^* for the onset of buckling of a specimen of length l fixed at both ends, assuming linear stress/strain behaviour of the material under test, is given by:

$$F^* = \frac{\pi^2 E_c I}{l^2} \quad (\text{B.1})$$

where

F^* is the critical buckling load, in newtons;

I is the second moment of inertia of the cross-sectional area, in millimetres to the power of 4;

E_c is the compressive modulus, in newtons per square millimetre;

l is the specimen length, in millimetres.

The critical force can be replaced by the corresponding nominal strain at buckling in accordance with equation (B.2):

$$F^* = E_c A \varepsilon_b \quad (\text{B.2})$$

where

A is the cross-sectional area, in square millimetres;

ε_b is the nominal compressive strain at buckling (dimensionless).

This gives the critical buckling strain, which depends only upon the dimensions of the specimen, in accordance with equation (B.3):

$$\varepsilon_b = \pi^2 \times \frac{I}{Al^2} \quad (\text{B.3})$$

For the different types of specimen shape, equation (B.3) can be expressed as follows:

a) For a right prism:

$$\varepsilon_b = \frac{\pi^2}{12} \times \left(\frac{h}{l}\right)^2 \quad (\text{B.4})$$

b) For a right cylinder or tube:

$$\varepsilon_b = \frac{\pi^2}{4} \times \left(\frac{r}{l}\right)^2 \times \left[l + \left(\frac{r_i}{r}\right)^2 \right] \quad (\text{B.5})$$

where

- l is the length of the right prism, cylinder or tube, i.e. the dimension parallel to the compressive force, in millimetres;
- h is the thickness of the right prism, i.e. the smallest side of the cross-section, in millimetres;
- r is the radius of the cylinder or the outer radius of the tube, in millimetres;
- r_i is the inner radius of the tube (zero for a cylinder), in millimetres.

The additional stability of the tube compared to the cylinder as shown by equation (B.5) cannot be used, as thin-walled tubes fail in accordance with additional buckling modes not discussed here. The numerical factors used in equations (B.4) and (B.5) equal 0,8 and 0,6 respectively. As these equations give only a rough estimate of the buckling strain, they approximate to the general inequality (1) in 6.1.1, in which the numerical factor chosen has been decreased to avoid buckling.

Annex C (normative)

Compliance correction

If the decrease ΔL in the distance between the compression plates cannot be measured directly and has to be replaced by precisely recording the displacement s between the crossheads of the test machine, this difference in displacement shall be corrected for the compliance C_M of the machine (see note 1). C_M is determined using a parallel-sided strip or prism of highly rigid reference material of known compressive modulus (see note 2), e.g. from steel sheet. The deflection s is calculated using the equations

$$\Delta L = s - C_M F \quad (\text{C.1})$$

and

$$C_M = \frac{s_R}{F} - \frac{L_R}{(b_R d_R) E_{cR}} \quad (\text{C.2})$$

where

ΔL is the decrease in the distance between the compression plates, in millimetres;

s is the change, in millimetres, in the distance between two selected points on the test machine;

C_M is the compliance, in millimetres per newton, of the test machine between the selected points;

s_R is the change, in millimetres, in the distance between the selected points when using the reference specimen;

F is the force, in newtons;

E_{cR} is the compressive modulus, in megapascals, of the reference material;

L_R is the initial distance, in millimetres, between the compression plates;

b_R is the width, in millimetres, of the reference specimen;

d_R is the thickness, in millimetres, of the reference specimen.

Ensure that the compliance C_M is constant for the relevant range of forces. The simple linear relation ($s = C_M \times F$) assumed here for machine deformation due to the compliance of the machine may not be valid if e.g. seating effects occur in one or more components of the machine.

NOTE 1 Three parts of the test machine contribute to its compliance C_M , the largest contribution commonly being that from the grips, the second largest that from the force transducer and the smallest that from the frame of the machine.

NOTE 2 For the stresses encountered during the determination of machine compliance, it can be assumed that the compressive modulus of the reference material is identical to the tensile modulus.

Bibliography

- [1] ISO 472:1999, *Plastics — Vocabulary*
- [2] ISO 3597-3:1993, *Textile-glass-reinforced plastics — Determination of mechanical properties on rods made of roving-reinforced resin — Part 3: Determination of compressive strength*
- [3] ISO 7616:1986, *Cellular plastics, rigid — Determination of compressive creep under specific load and temperature conditions*
- [4] ISO 7743:1989, *Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of compression stress-strain properties*
- [5] ISO 14126:1999, *Fibre-reinforced plastic composites — Determination of compressive properties in the in-plane direction*

(Continued from second cover)

<i>International Standard</i>	<i>Corresponding Indian Standard</i>	<i>Degree of Equivalence</i>
ISO 2602 : 1980 Statistical interpretation of test results — Estimation of the mean — Confidence interval	IS 14277 : 1996 Statistical interpretation of test results — Estimation of mean, standard deviation and regression coefficient — Confidence interval	Technically Equivalent
ISO 2818 : 1994 Plastics — Preparation of test specimens by machining	IS 13360 (Part 2/Sec 4) : 1999 Plastics — Methods of testing: Part 2 Sampling and preparation of test specimens, Section 4 Preparation of test specimens by machining (<i>first revision</i>)	Identical
ISO 3167 : 2002 Plastics — Multipurpose test specimens	IS 13360 (Part 2/Sec 5) : 2013 Plastics — Methods of testing: Part 2 Sampling and preparation of test specimens, Section 5 Multipurpose test specimens (<i>first revision</i>)	do
ISO 10724-1 : 1998 Plastics — Injection moulding of test specimens of thermosetting powder moulding compounds (PMCs) — Part 1: General principles and moulding of multipurpose test specimens	IS 13360 (Part 2/Sec 10) : 2006 Plastics — Methods of testing: Part 2 Sampling and preparation of test specimens, Section 10 Injection moulding of test specimens of thermosetting powder moulding compounds (PMCs) — General principles and moulding of multipurpose test specimens	do

The technical committee has reviewed the provision of the following International Standard referred in this adopted standard and has decided that it is acceptable for use in conjunction with this standard:

<i>International Standard</i>	<i>Title</i>
ISO 5893 : 2002	Rubber and plastic test equipment — Testing, flexural and compression types(constant rate of traverse — Specification)

For tropical countries like India, the standard temperature and the relative humidity shall be taken as $27 \pm 2^{\circ}\text{C}$ and 65 ± 5 percent, respectively.

In reporting the result of a test or analysis made in accordance with this standard, if the final value, observed or calculated, is to be rounded off, it shall be done in accordance with IS 2 : 1960 'Rules for rounding off numerical values (*revised*)'.

Bureau of Indian Standards

BIS is a statutory institution established under the *Bureau of Indian Standards Act*, 1986 to promote harmonious development of the activities of standardization, marking and quality certification of goods and attending to connected matters in the country.

Copyright

BIS has the copyright of all its publications. No part of these publications may be reproduced in any form without the prior permission in writing of BIS. This does not preclude the free use, in course of implementing the standard, of necessary details, such as symbols and sizes, type or grade designations. Enquiries relating to copyright be addressed to the Director (Publications), BIS.

Review of Indian Standards

Amendments are issued to standards as the need arises on the basis of comments. Standards are also reviewed periodically; a standard along with amendments is reaffirmed when such review indicates that no changes are needed; if the review indicates that changes are needed, it is taken up for revision. Users of Indian Standards should ascertain that they are in possession of the latest amendments or edition by referring to the latest issue of 'BIS Catalogue' and 'Standards: Monthly Additions'.

This Indian Standard has been developed from Doc No.: PCD 12 (2491).

Amendments Issued Since Publication

Amendment No.	Date of Issue	Text Affected

BUREAU OF INDIAN STANDARDS

Headquarters:

Manak Bhavan, 9 Bahadur Shah Zafar Marg, New Delhi 110002

Telephones: 2323 0131, 2323 3375, 2323 9402

Website: www.bis.org.in

Regional Offices:

Telephones

Central	: Manak Bhavan, 9 Bahadur Shah Zafar Marg NEW DELHI 110002	{ 2323 7617 2323 3841
Eastern	: 1/14, C.I.T. Scheme VII M, V.I.P. Road, Kankurgachi KOLKATA 700054	{ 2337 8499, 2337 8561 2337 8626, 2337 9120
Northern	: SCO 335-336, Sector 34-A, CHANDIGARH 160022	{ 260 3843 260 9285
Southern	: C.I.T. Campus, IV Cross Road, CHENNAI 600113	{ 2254 1216, 2254 1442 2254 2519, 2254 2315
Western	: Manakalaya, E9 MIDC, Marol, Andheri (East) MUMBAI 400093	{ 2832 9295, 2832 7858 2832 7891, 2832 7892

Branches: AHMEDABAD. BANGALORE. BHOPAL. BHUBANESHWAR. COIMBATORE. DEHRADUN. FARIDABAD. GHAZIABAD. GUWAHATI. HYDERABAD. JAIPUR. KANPUR. LUCKNOW. NAGPUR. PARWANOO. PATNA. PUNE. RAJKOT. THIRUVANATHAPURAM. VISAKHAPATNAM.

