

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

- 2



" DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EXTENSIOMETRO PARA  
VIDRIO FUNDIDO "

Ing. Octavio Elizondo

Asesor: Dr. Jorge Rhi-Sausi G.



CENTRO DE INVESTIGACIONES  
EN QUIMICA

- 2

57

TP85

E5



57



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EXTENSÓMETRO PARA

VIDRIO FUNDIDO

Octavio Elizanda S.

RESUMEN

El vidrio es una sustancia muy común y versátil debido a la gran variedad de propiedades físicas, químicas y mecánicas que adquiere, su comportamiento conforme a las leyes generales es diferente con respecto a la mayoría de los materiales.

El estudio de las propiedades reológicas del vidrio es de fundamental importancia para el análisis y control de los procesos de fabricación. Parámetros como viscosidad, elongación, módulos de relajación, etc. convierten singular importancia en la caracterización del mismo.

Construcción de un extensómetro y su aplicación al

vidrio, así como las características climáticas que afectan el



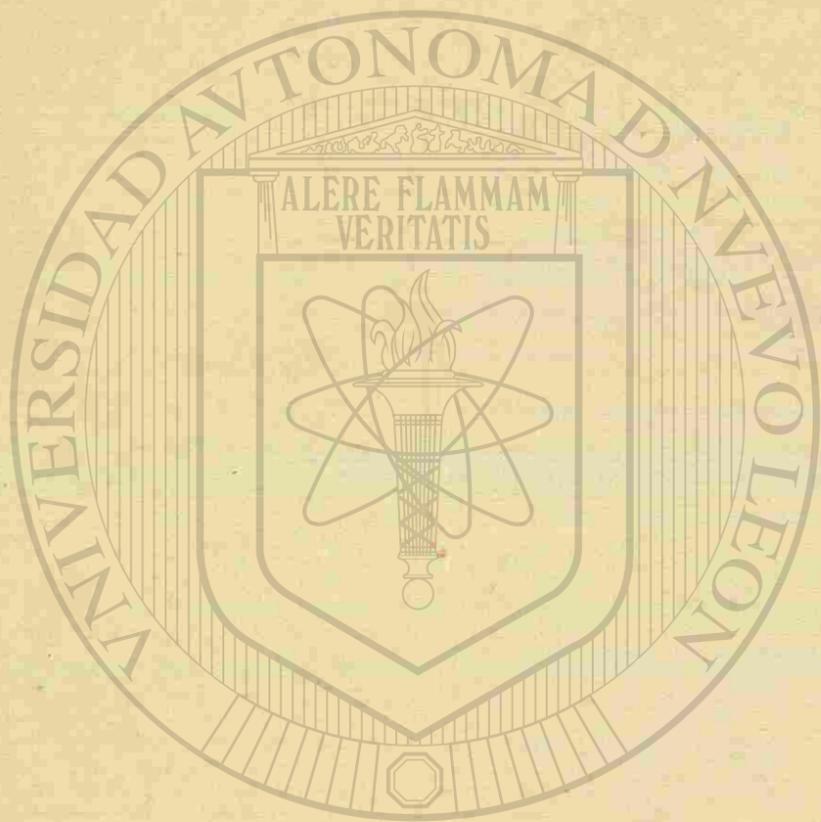
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

TP857  
.E5

1007565



FONDO UNIVERSITARIO

37396

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

22-IX-06 JIN.

" DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EXTENSIOMETRO PARA VIDRIO FUNDIDO "

Octavio Elizondo G.

RESUMEN

El vidrio aún siendo una substancia muy común y versátil debido a la gran variedad de propiedades físicas, químicas y mecánicas que adopta, su comportamiento conforme a las leyes generales es diferente con respecto a la mayoría de los materiales.

El conocimiento de las propiedades reológicas del vidrio es de fundamental importancia para el análisis y control de los procesos de transformación. Parámetros como viscosidad, celeridad, módulos de relajación, etc. adquieren singular importancia en la caracterización del vidrio.

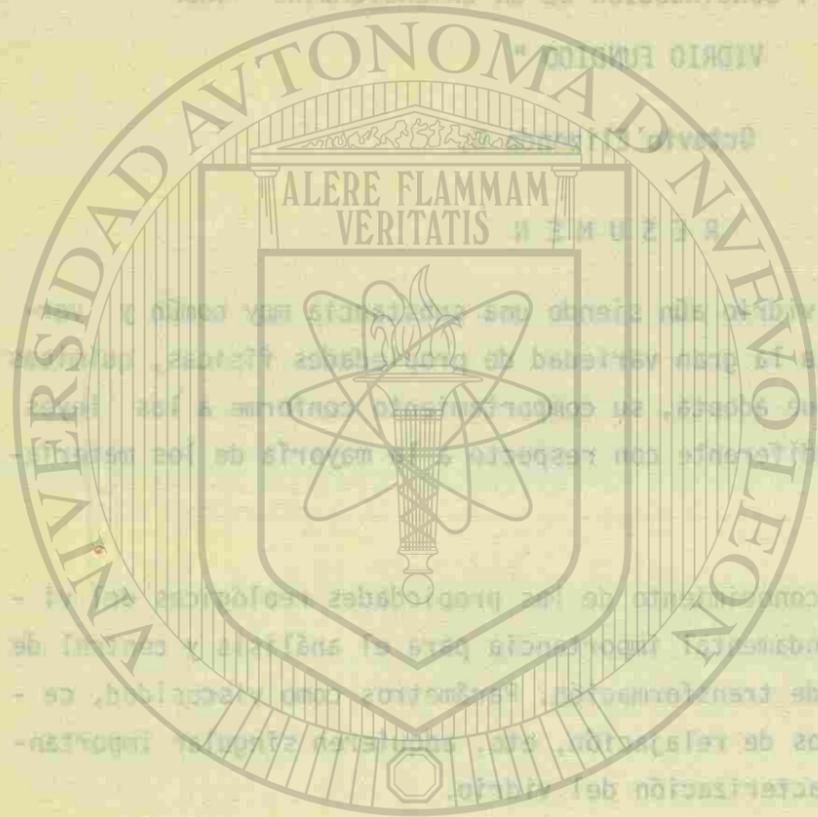
Consideraciones sobre la naturaleza y propiedades del vidrio, así como las ecuaciones cinemáticas que posibilitan el diseño de un extensiómetro para vidrio fundido, serán presentadas.

Apéndices

- B. Características de los vidrios fundidos
- C. Modelos para la construcción del extensiómetro

Referencias  
Bibliografía





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

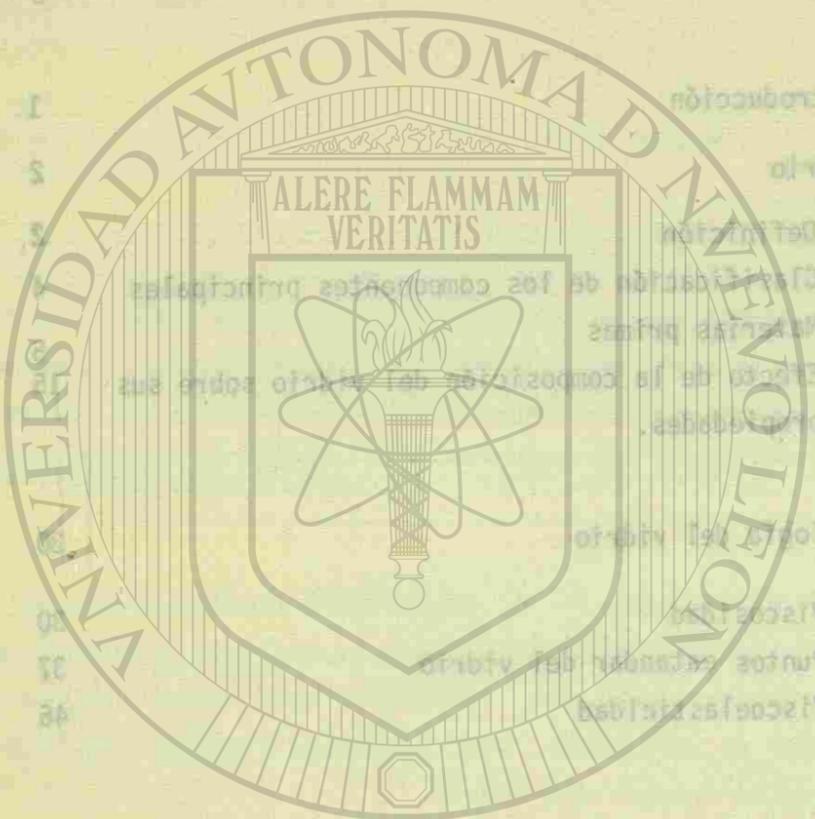
INTRODUCCION. CONTENIDO

	Página
Introducción	1
Cap. I .- Vidrio	2
a) Definición	2
b) Clasificación de los componentes principales	4
c) Materias primas	5
d) Efecto de la composición del vidrio sobre sus propiedades.	15
Cap. II .- Reología del vidrio	30
a) Viscosidad	30
b) Puntos estandar del vidrio	37
c) Viscoelasticidad	46
Cap. III.- Diseño y construcción de un Extensiómetro para vidrio fundido.	68
a) Bases del diseño	68
b) Selección de equipo	75
Extensiómetro para vidrio fundido	84
Apéndices	84
A. Programación de actividades	84
B. Características y cotizaciones de equipo	87
C. Modelos para fluidos no newtonianos.	88
Referencias	90
Nomenclatura	92

CONTENIDO

Página

1	Introducción
2	Cap. I - Vidrio
3	a) Definición
4	b) Características de los componentes principales
5	c) Materias primas
6	d) Efecto de la composición del vidrio sobre sus propiedades
7	Cap. II - Reología del vidrio
8	a) Viscosidad
9	b) Puntos característicos del vidrio
10	c) Viscosidad
11	Cap. III - Diseño y construcción de un Extensiómetro para vidrio fundido
12	a) Bases del diseño
13	b) Selección de equipo
14	Apéndices
15	A. Programación de actividades
16	B. Características y cotizaciones de equipo
17	C. Modelos para flujos no newtonianos
18	Referencias
19	Nomenclatura
20	
21	



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

INTRODUCCION.

a) - Definición

Algunos intentos modernos por dar una definición técnica en el Vidrio es una sustancia muy versátil debido a la gran variedad de propiedades físicas, químicas y mecánicas que puede adoptar con solo modificar la composición del mismo. Su principal función es proteger al hombre y sus invenciones, dejar pasar la luz, decorativa, y como una herramienta en la exploración de la ciencia.

Las propiedades reológicas en estado estable e inestable del vidrio recibe mucha atención en círculos de manufactura, debido a la influencia tan marcada del comportamiento del material en algunas partes del proceso de fabricación.

Datos sobre el comportamiento reológico del vidrio son sumamente escasos en la literatura, ello motivó el proyecto de diseño y construcción de un Extensiómetro para vidrio fundido, que nos dé información sobre las características viscoelásticas del material, de tal manera que podamos inferir su modelo de comportamiento.

A continuación se presenta un breve estudio sobre la naturaleza y propiedades del vidrio, así como las bases de reología y diseño del Extensiómetro para vidrio fundido.

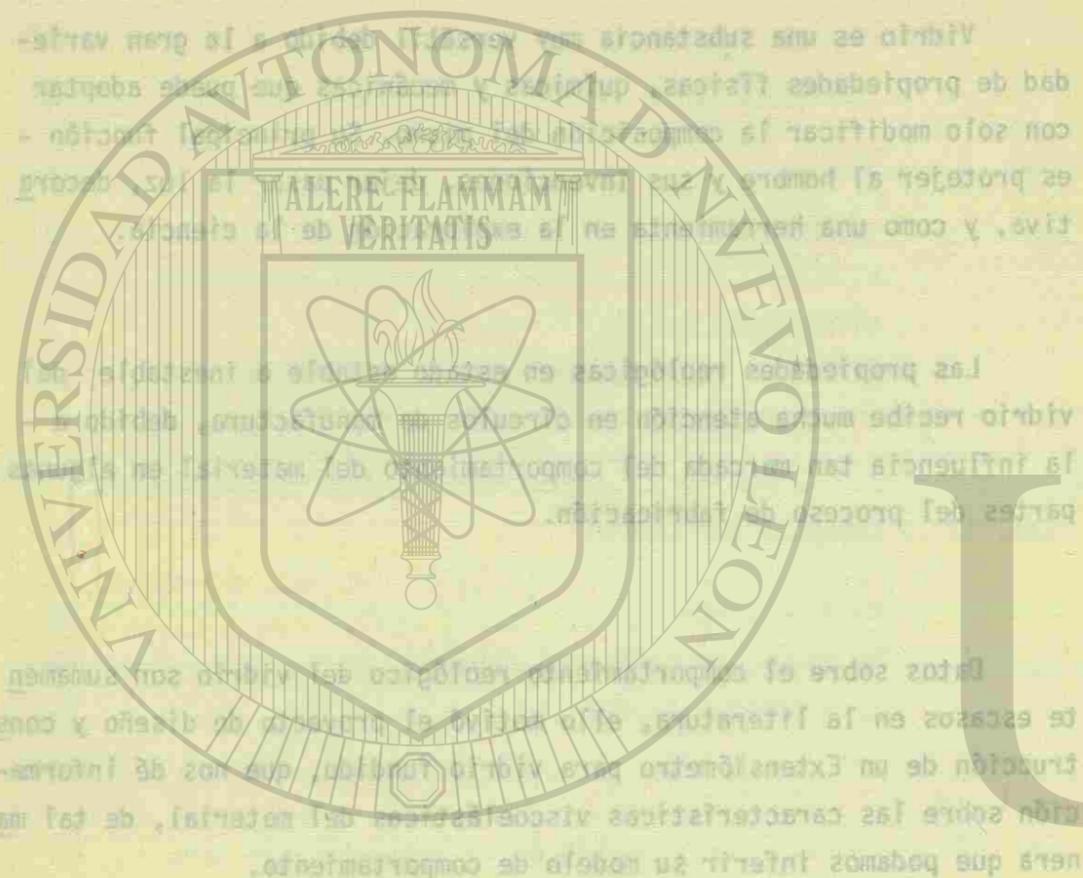
## CAPITULO I. VIDRIO

a).- Definición

Algunos intentos modernos por dar una definición técnica del vidrio, son en orden cronológico los siguientes:

- 1) (1920), Vidrio es un sólido estructuralmente amorfo (1). (basado en un patrón difuso de difracción de rayos X del vidrio).
- 2) (1938) después de Morey (2) "Un vidrio es una sustancia inorgánica en una condición tal que es una continuación del estado líquido de la misma, lo cual es el resultado de un cambio reversible en viscosidad, esta sustancia es considerada para propósitos prácticos como rígida".
- 3) (1949) de A.S.T.M. (3), "Vidrio es un producto inorgánico de fusión, el cual fué enfriado hasta adoptar condiciones rígidas, libre de cristalización".
- 4) (1960) después de Secrist y Mackenzic (4) "Vidrio es un sólido no cristalino".

En cierto sentido, el desarrollo histórico de éstas definiciones refleja una evolución del pensamiento en cuanto al alcance, crecimiento y entendimiento del campo de la ciencia del vidrio. Veamos, los vidrios orgánicos cuyo comportamiento es muy similar a los vidrios inorgánicos, fueron conocidos en 1930 (3), pero fueron considerados poco importantes tecnológicamente para ser incluidos dentro de una definición hasta 1960. Similarmente, algunos métodos de fabricación como, ondas de choque, bombardeo de neutrones y depositación de vapor pueden ser utilizados para fabricar vidrios con propiedades muy similares a los fabricados por el método de fusión (4), que no

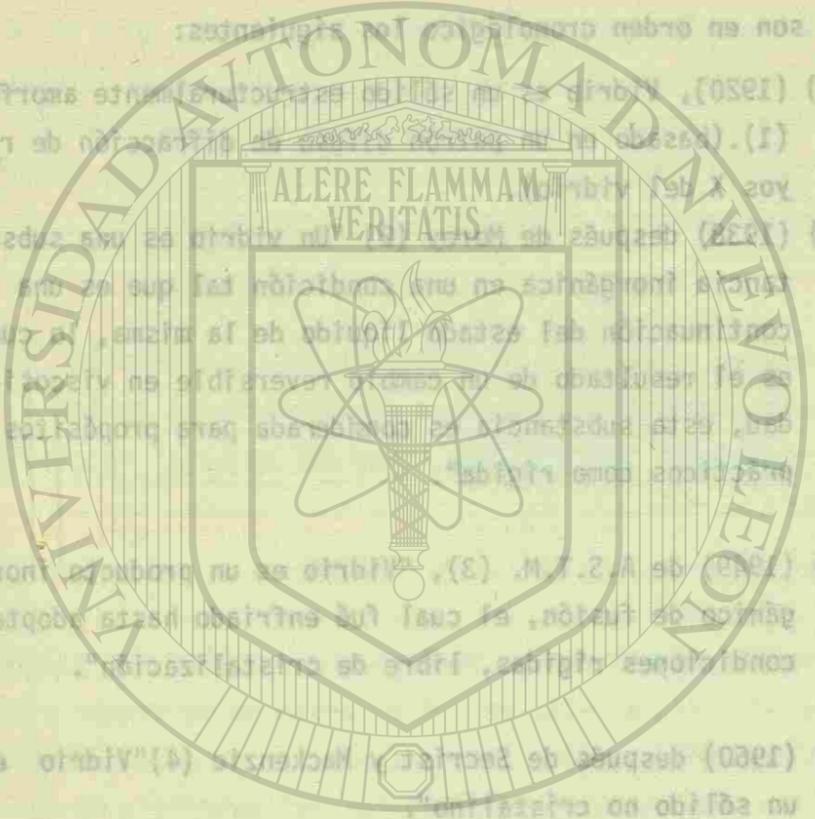


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

a) - Definición

Algunos intentos modernos por dar una definición técnica del vidrio, son en orden cronológico:

- 1) (1920), Koberg, "Vidrio es un estado amorfo de un sólido cristalino".
- 2) (1928) después de haber estudiado un vidrio es un sólido amorfo que se caracteriza por su estructura atómica en un estado amorfo, a cual se le atribuye un estado amorfo de la materia, a cual se le atribuye un estado amorfo de la materia, a cual se le atribuye un estado amorfo de la materia.
- 3) (1930) de A. S. M. (3), "Vidrio es un producto amorfo de un estado amorfo de la materia, a cual se le atribuye un estado amorfo de la materia, a cual se le atribuye un estado amorfo de la materia".
- 4) (1960) después de haber estudiado un vidrio es un sólido amorfo que se caracteriza por su estructura atómica en un estado amorfo, a cual se le atribuye un estado amorfo de la materia, a cual se le atribuye un estado amorfo de la materia.



eran incluidos en una definición de vidrio hasta 1960. Estos nos muestra que las definiciones dos y tres intentaban solamente definir los vidrios de más alto valor comercial, sin embargo los vidrios producidos por otros métodos se hacían más importantes tecnológica y comercialmente.

La primera y la cuarta definición son prácticamente la misma, solo que en la primera la detección del estado amorfo se hace en base a un patrón de difracción de rayos X, en cambio en la cuarta se puede utilizar cualquier método para detectar este estado de agregación de la materia.

Así la pequeña definición número cuatro parece ser la más satisfactoria debido a que incluye todo material con tal que sea no cristalino, despreciando su composición y método de fabricación. Esta definición es también consistente con la sugerencia de Mott, que todo sólido puede ser clasificado como cristalino ó amorfo, (5).

Esta última definición implica que siempre debemos poder distinguir en el material el estado cristalino y no cristalino, sin embargo esto no siempre es posible, porque existen muchas sustancias cristalinas que tienen el arreglo de sus cristales muy desordenado, Eckstein (6) le llamó a este desarreglo de los cristales defecto de concentración.

En el proceso de identificación en los sólidos del estado cristalino ó amorfo, nos encontramos que las propiedades físicas de las sustancias no varían con igual tendencia, así encontramos que la sílica (SiO<sub>2</sub>) en estado amorfo desarrolla un incremento en densidad y coeficiente de expansión térmica cuando cristaliza, el óxido de Boro (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) amorfo muestra un decremento en el coeficiente de expansión térmica cuando cristaliza, el óxido de Boro (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) amorfo muestra un

En cuanto a la definición técnica de vidrio, el desarrollo de la ciencia del vidrio, vamos a ver que la evolución del concepto de vidrio, creyendo y entendiendo del campo de la ciencia del vidrio. Veamos, los vidrios orgánicos cuyo comportamiento es muy similar a los vidrios inorgánicos, fueron conocidos en 1850 (3) pero fueron considerados poco importantes, pero en los últimos años dentro de una definición hasta 1960. Similares, algunos métodos de fabricación como, ondas de choque, bombas de neutrones y deposición de vapor pueden ser utilizados para fabricar vidrios con propiedades muy similares a los fabricados por el método de fusión (4), que no

decremento en el coeficiente de expansión térmica con un incremento de densidad al cristalizar, tabla 1.

Tabla 1.- Densidad y coeficiente de expansión térmica del  $\text{SiO}_2$  y  $\text{B}_2\text{O}_3$  en estado vítreo y cristalino (1).

Compuesto	Coeficiente de expansión Térmico /°C	Densidad gr/cm <sup>3</sup>
$\text{SiO}_2$		
a) vitrea	$7 \times 10^{-7}$	2.20
b) cristobalita	$170 \times 10^{-7}$	2.32
$\text{B}_2\text{O}_3$		
a) vitrea	$150 - 160 \times 10^{-7}$	1.81
b) cristalino	$130 - 140 \times 10^{-7}$	2.46

#### b) Clasificación de los componentes principales

Los elementos que componen los vidrios pueden agruparse en seis familias que desempeñan funciones distintas en la fabricación, las cuales son: (7)

- 1.- Los vitrificantes
- 2.- Las bases
- 3.- Los fundentes
- 4.- Los elementos intermediarios, los cuales pueden actuar como vitrificantes ó modificadores, tales como la alúmina y el óxido de fierro.
- 5.- Elementos accesorios introducidos generalmente en dosis pequeña, demasiado débil para modificar sensiblemente las --

eran incluidos en una definición de vidrio hasta 1960. Estos nos muestra que las definiciones dos y tres intentaban solamente definir los vidrios de más alto valor comercial, sin embargo los vidrios producidos por otros métodos se han desarrollado tecnológicamente y son comercialmente.

La primera definición de vidrio que se encuentra en la literatura es la misma, solo que en la primera el dato de densidad no se menciona. Se en base a un punto de fusión de  $1700^\circ\text{C}$  en cambio en la cuarta se puede utilizar cualquier método para determinar este estado de agregación de la materia.

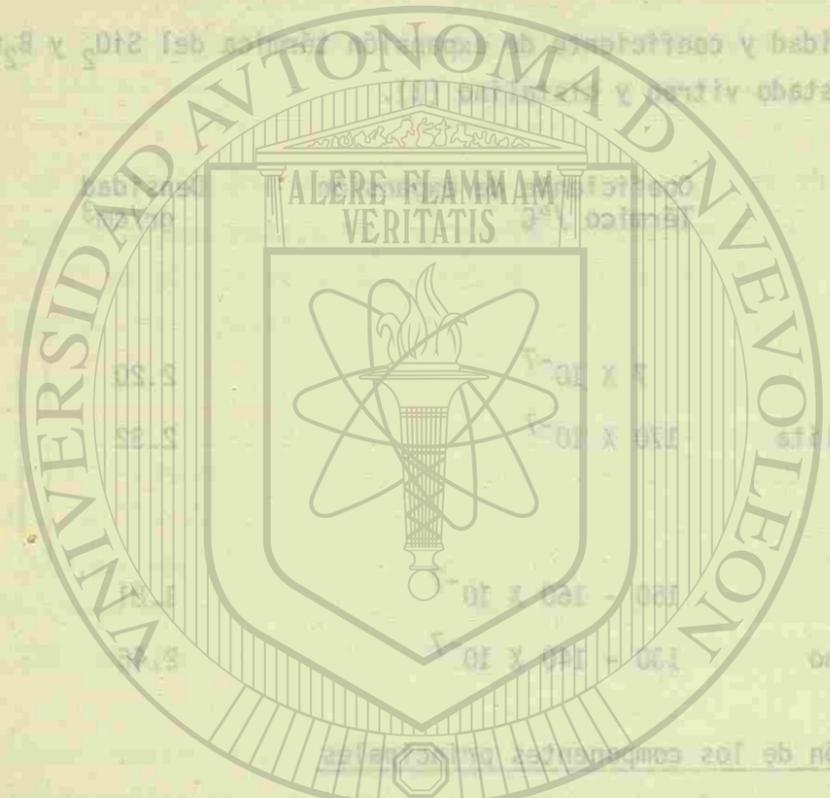
Esta definición es más consistente con la respuesta de los que todo sólido puede ser cristalizado como cristales (8).

Este otro definición implica que debemos poder distinguir en el material el estado cristalino, no cristalino, sin embargo esto no siempre es posible, porque existen muchas sustancias cristalinas que tienen el arreglo de sus cristales muy desordenado (9). Le llamé a esto desordenamiento de los cristales (10).

En el proceso de identificación en los sólidos del estado cristalino ó amorfo, nos encontramos que las propiedades físicas de las sustancias no cambian con igual intensidad. Así encontramos que la atenuación (11) en estado amorfo desarrolla un incremento en densidad y coeficiente de expansión térmica cuando cristaliza, el índice de refracción (12) muestra un decremento en el coeficiente de expansión térmica cuando cristaliza, el índice de refracción (13) muestra un

decrecimiento en el coeficiente de expansión térmica con un incremento de densidad al cristalizar, tabla 1.

Tabla 1.- Densidad y coeficiente de expansión térmica de algunos vidrios en estado vítreo y cristalinizado.



Compuesto  
a) vítreo  
b) cristalinizado

Los elementos que componen los vidrios pueden agruparse en seis familias que desempeñan funciones distintas en la fabricación, las cuales son: (v)

- 1.- Los fundentes
- 2.- Las bases
- 3.- Los modificadores
- 4.- Los colorantes
- 5.- Los elementos accesorios introducidos generalmente en dosis pequeñas, demerado débil para modificar sensiblemente las propiedades del vidrio, y que intervienen como correctivo, decolorante ó colorante.
- 6.- Elementos parasitarios, es decir, introducidos accidentalmente por las materias primas, impurezas y gases disueltos.

Tabla 2. propiedades del vidrio, y que intervienen como correctivo, decolorante ó colorante.

6.- Elementos parasitarios, es decir, introducidos accidentalmente por las materias primas, impurezas y gases disueltos.

Vitrificante

La tabla 2 muestra los principales productos que representan a cada una de las familias antes mencionadas.

Plimat (8) clasifica los componentes del vidrio de acuerdo a la función que desempeñan, en formadores de vidrio, intermedios, modificadores y gases, Fig. 1

c) Materias Primas

A continuación se presenta un breve estudio de las materias primas utilizadas para añadir los principales elementos que forman el vidrio.

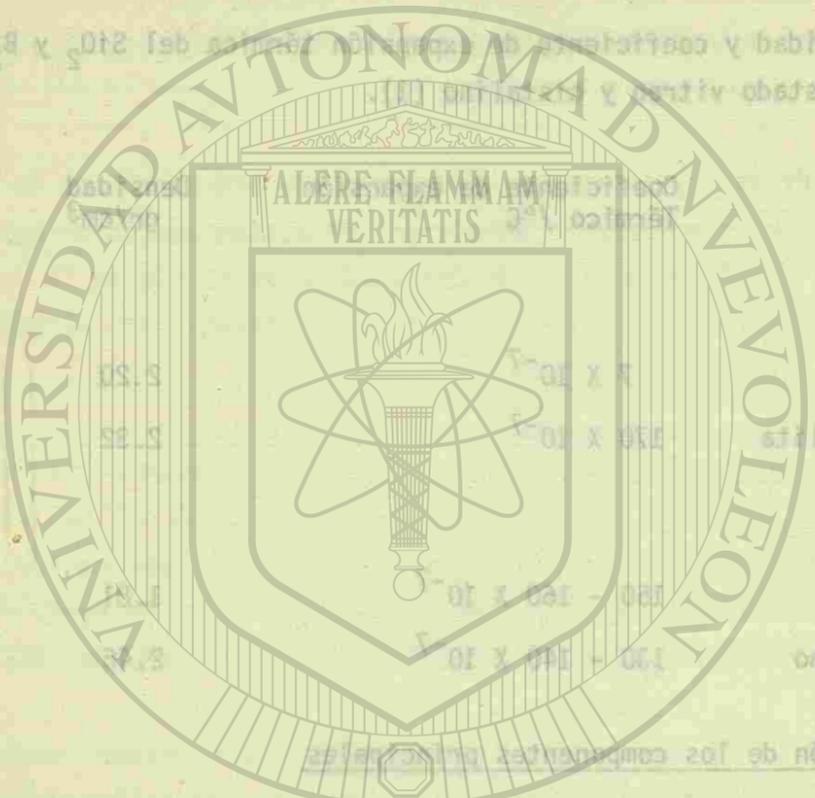
Silice (SiO<sub>2</sub>), muy raramente incluso en vidriería óptica, se utiliza el cuarzo, debido a su costo y dureza, por lo que las arenas silíceas son las que proporcionan casi la totalidad de este compuesto, la concentración de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en estas arenas varía dependiendo del tipo de vidrio por fabricar, Tabla 3.

Oxido de Boro (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) este compuesto se añade a partir de minerales Naturales boratados ó de productos químicos fabricados, Tabla 4.

Elementos parasitarios

decrecimiento en el coeficiente de expansión térmica con un incremento de densidad al cristalizar, tabla 1.

Tabla 1.- Densidad y coeficiente de expansión térmica de algunos vidrios en estado vítreo y cristalinizado.



Comuesto	a) vidrios	b) cristalinizados
$SiO_2$	2.65	2.65
$CaO$	2.80	2.80
$Na_2O$	2.28	2.28
$K_2O$	2.47	2.47
$B_2O_3$	2.46	2.46
$PbO$	9.53	9.53
$ZnO$	5.68	5.68
$Al_2O_3$	3.95	3.95
$MgO$	3.58	3.58
$Fe_2O_3$	5.02	5.02
$CoO$	6.87	6.87
$NiO$	7.47	7.47
$MnO$	5.03	5.03
$CuO$	7.68	7.68
$SrO$	4.63	4.63
$Li_2O$	2.64	2.64
$Ag_2O$	7.14	7.14
$BaO$	5.72	5.72
$CaF_2$	3.18	3.18
$CaCl_2$	2.95	2.95
$CaBr_2$	3.00	3.00
$CaI_2$	3.15	3.15
$CaSO_4$	3.06	3.06
$CaCO_3$	2.93	2.93
$CaHPO_4$	3.00	3.00
$CaH_2PO_4$	3.00	3.00
$CaH_3PO_4$	3.00	3.00
$CaH_4PO_4$	3.00	3.00
$CaH_5PO_4$	3.00	3.00
$CaH_6PO_4$	3.00	3.00
$CaH_7PO_4$	3.00	3.00
$CaH_8PO_4$	3.00	3.00
$CaH_9PO_4$	3.00	3.00
$CaH_{10}PO_4$	3.00	3.00
$CaH_{11}PO_4$	3.00	3.00
$CaH_{12}PO_4$	3.00	3.00
$CaH_{13}PO_4$	3.00	3.00
$CaH_{14}PO_4$	3.00	3.00
$CaH_{15}PO_4$	3.00	3.00
$CaH_{16}PO_4$	3.00	3.00
$CaH_{17}PO_4$	3.00	3.00
$CaH_{18}PO_4$	3.00	3.00
$CaH_{19}PO_4$	3.00	3.00
$CaH_{20}PO_4$	3.00	3.00

Los elementos que componen los vidrios pueden agruparse en seis familias que desempeñan funciones distintas en la fabricación, las cuales son: (v)

- 1.- Las bases
- 2.- Los fundentes
- 3.- Los modificadores
- 4.- Los colorantes
- 5.- Los opacificantes
- 6.- Los descolorantes

Tabla 2. propiedades del vidrio, y que intervienen como correctivo, decolorante ó colorante.

6.- Elementos parasitarios, es decir, introducidos accidentalmente por las materias primas, impurezas y gases disueltos.

Vitrificante  
La tabla 2 muestra los principales productos que representan a cada una de las familias antes mencionadas.

Plimat (8) clasifica los componentes del vidrio de acuerdo a la función que desempeñan, en formadores de vidrio, intermedios, modificadores y gases, Fig. 1

c) Materias Primas

A continuación se presenta un breve estudio de las materias primas utilizadas para añadir los principales elementos que forman el vidrio.

Silice ( $SiO_2$ ), muy raramente incluso en vidriería óptica, se utiliza el cuarzo, debido a su costo y dureza, por lo que las arenas silíceas son las que proporcionan casi la totalidad de este compuesto, la concentración de  $Fe_2O_3$  en estas arenas varía dependiendo del tipo de vidrio por fabricar, Tabla 3.

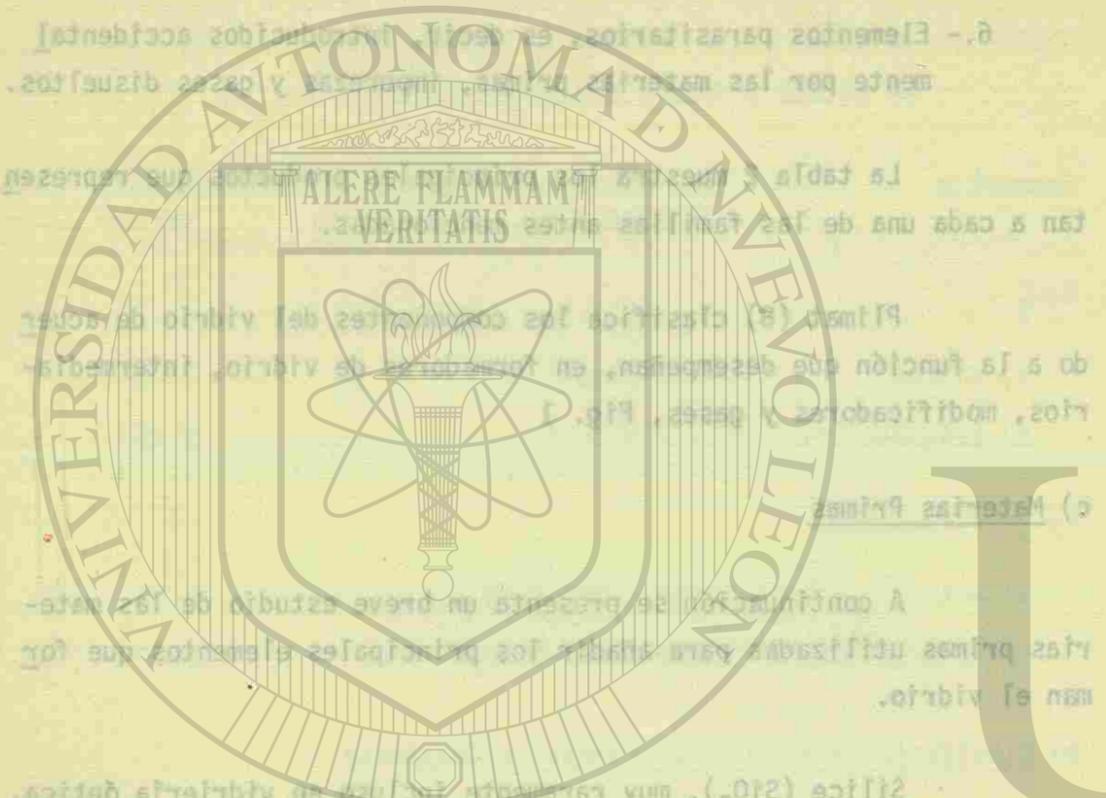
Oxido de Boro ( $B_2O_3$ ) este compuesto se añade a partir de minerales Naturales boratados ó de productos químicos fabricados, Tabla 4.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

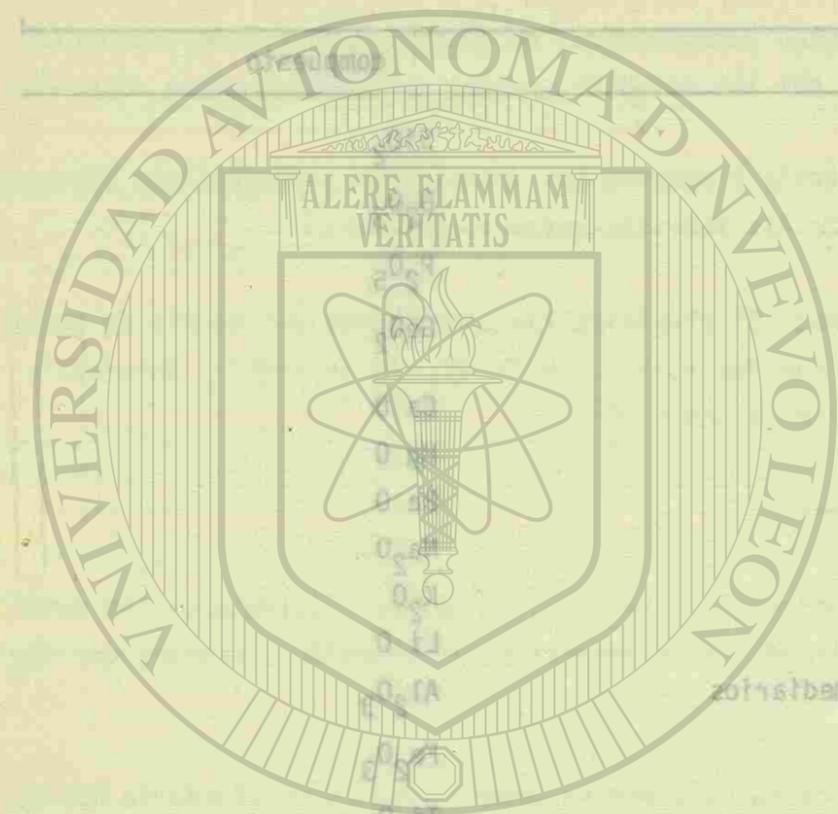
Tabla 2. Principales componentes del vidrio de acuerdo a la función que desempeñan (7).

función	compuesto
Vitrificante	SiO <sub>2</sub>
	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	GeO <sub>2</sub>
base	Ca O
	Mg O
	Ba O
fundentes	Na <sub>2</sub> O
	K <sub>2</sub> O
	Li O
Elementos intermediarios	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Ti O <sub>2</sub>
	Pb O
Elementos accesorios	Mn O <sub>2</sub>
	Co O
	Ni O
	Se
Elementos parasitarios	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	F
	SO <sub>3</sub>
	CO <sub>2</sub>
	O <sub>2</sub>

Fig. 1. - Clasificación de algunos componentes de acuerdo con la función que desempeñan en la fabricación del vidrio, reordenando el orden de la abscisa en la ordenada y abscisa en la ordenada y abscisa en la ordenada y abscisa en la ordenada (8)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIONES

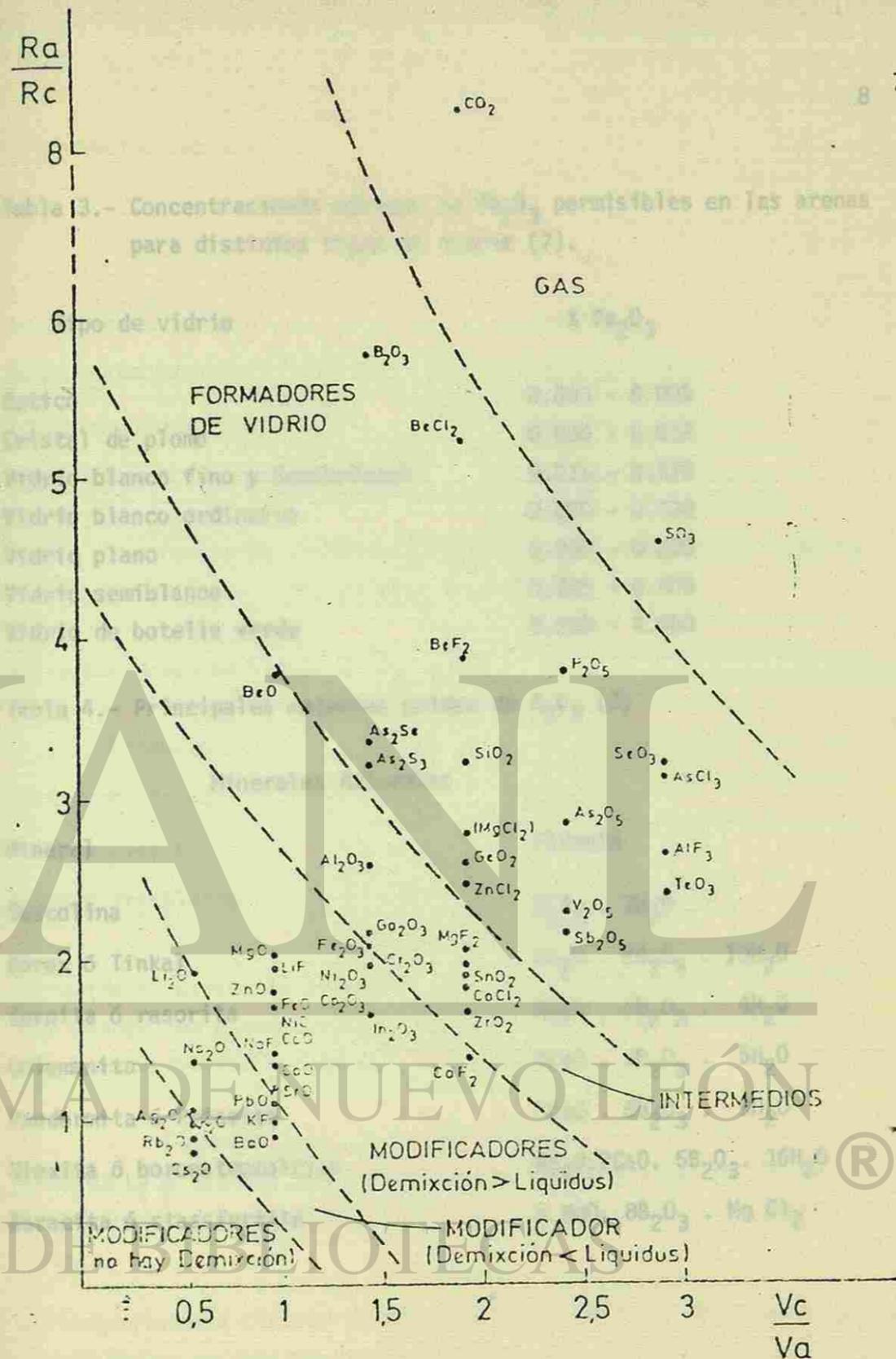
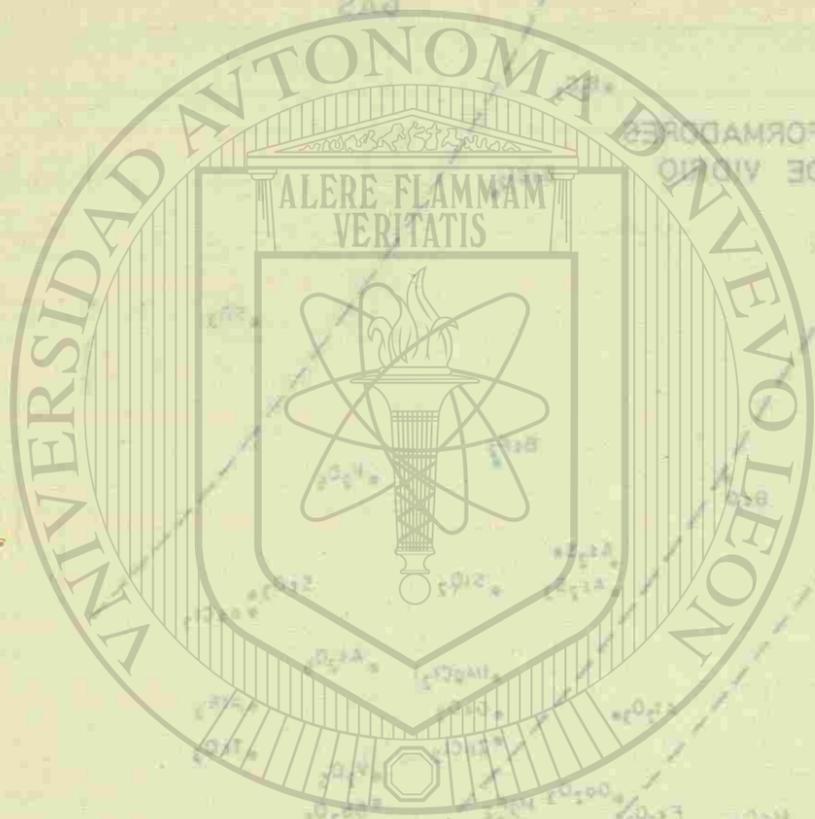


Fig. 1.- Clasificación de algunos componentes de acuerdo con la función que desempeñan en la fabricación del vidrio, relacionando el radio de anión a catión en la ordenada y valencia de catión a anión en la abscisa (8)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Continuación Tabla 4.

Tabla 3.- Concentraciones máximas de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> permisibles en las arenas para distintos tipos de vidrio (7).

Producto	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Optico	0.003 - 0.005
Cristal de plomo	0.006 - 0.012
Vidrio blanco fino y Semicristal	0.015 - 0.020
Vidrio blanco ordinario	0.020 - 0.030
Vidrio plano	0.050 - 0.200
Vidrio semiblanco	0.200 - 0.500
Vidrio de botella verde	0.500 - 4.000

Tabla 4.- Principales materias primas de B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (7)

Mineral	Fórmula
Sascolina	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 3H <sub>2</sub> O
Bórax ó Tinkal	Na <sub>2</sub> O · 2B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 10H <sub>2</sub> O
Kernita ó rasorita	Na <sub>2</sub> O · 2B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 4H <sub>2</sub> O
Colemanita	2CaO · 3B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 5H <sub>2</sub> O
Pandermita ó Priceita	5CaO · 6B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 9H <sub>2</sub> O
Ulexita ó boronatrocalcita	Na <sub>2</sub> O · 2CaO · 5B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 16H <sub>2</sub> O
Boracita ó stassfurtita	6 MgO · 8B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · Mg Cl <sub>2</sub>

Las composiciones típicas de los vidrios de mayor interés comercial y tecnológico se muestran en tabla 9.

Continuación Tabla 4.

Tabla 6. - Otras materias Primas de Productos Químicos (7)

Producto	Fórmula
Acido bórico	$H_3B O_3$
Bórax decahidratado	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$
Bórax pentahidratado	$Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$
Bórax anhidro (Espatofluor)	$Na_2B_4O_7$

Pentóxido de Fósforo ( $P_2O_5$ ), la adición de este compuesto se hace utilizando los siguientes productos.

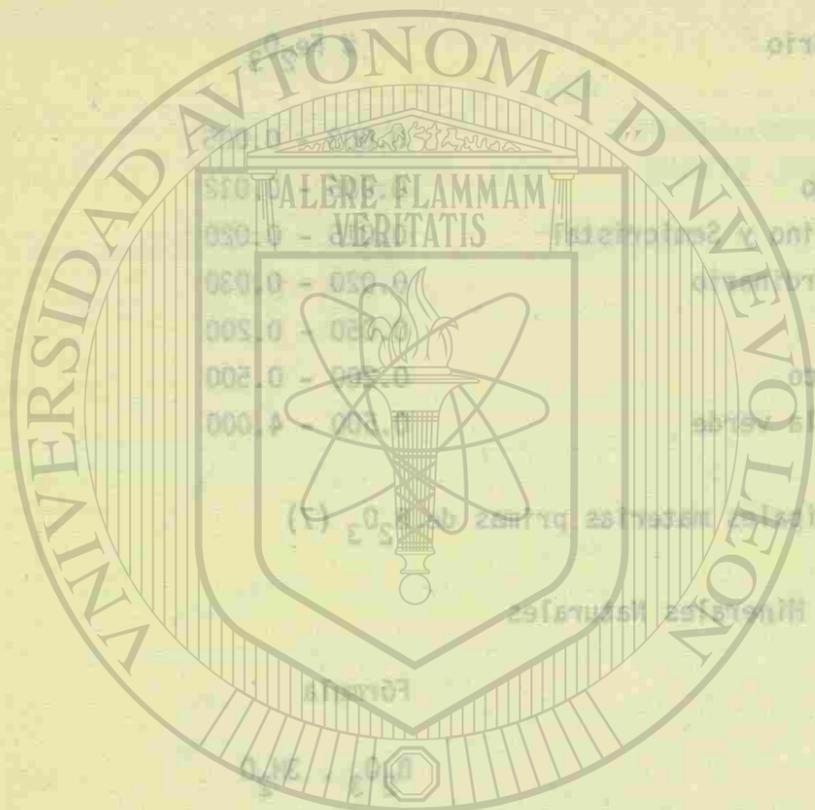
Tabla 5.- Materias Primas de  $P_2 O_5$  (7).

Producto	Fórmula
Fosfato bisódico	$Na_2 HPO_4$
Fosfato bicálcico	$Ca HPO_4$
Fosfato tricálcico	$Ca_3 (PO_4)_2$

Enseguida se presentan algunas listas de materias primas utilizadas para añadir los elementos que tienen las funciones de fundentes, bases, intermediarios y correctivos, tablas 6, 7, 8.

Es importante hacer notar que las formulaciones de vidrio se harán cada vez que sea posible con materias primas abundantes en la región donde se localiza la planta, con el propósito de disminuir costos.

Las composiciones típicas de los vidrios de mayor interés comercial y tecnológico se muestran en tabla 9.

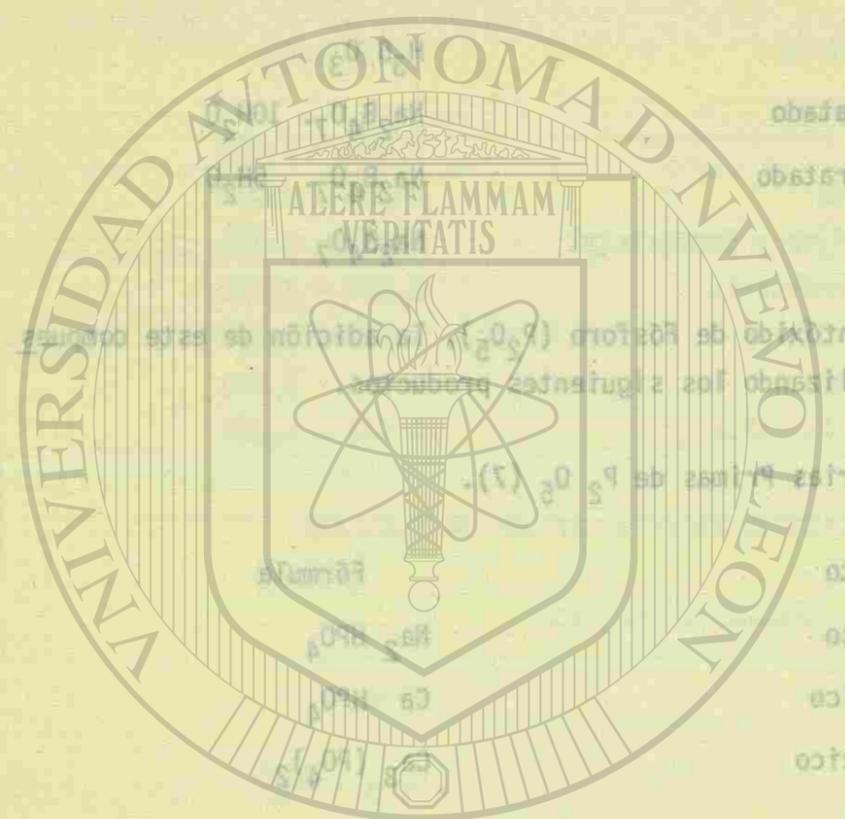


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Continuación Tabla 6

Tabla 6. Otras materias primas para vidrio (7).

Materia prima	Fórmula
Oxido de Calcio (Cal)	CaO
Carbonato de calcio	CaCO <sub>3</sub>
Fluoruro de calcio (Espatofluor)	Ca F <sub>2</sub>
Fosfato tricálcico	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>
Carbonato de calcio y Magnesio (Dolomita)	Mg CO <sub>3</sub> , CaCO <sub>3</sub>
Sulfato de calcio	Ca SO <sub>4</sub>
Carbonato de Magnesio	Mg CO <sub>3</sub>
Carbonato de Bario	Ba CO <sub>3</sub>
Sulfato de Bario	Ba SO <sub>4</sub>
Oxido de Zinc	Zn O
Minio	Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Carbonato de potasio	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
Nitrato de potasio	KNO <sub>3</sub>
Sulfato de Potasio	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>



Las composiciones típicas de los vidrios de mayor interés comercial y tecnológico se muestran en tabla 9.

Es importante hacer notar que las formulaciones de vidrio se harán cada vez que sea posible con materias primas abundantes en la región donde se fabrica el vidrio, con el propósito de disminuir los costos.

Las materias primas y correctivos, así como los procedimientos para añadir los elementos que tienen las funciones de fundentes, se encuentran en las tablas 5 y 6.

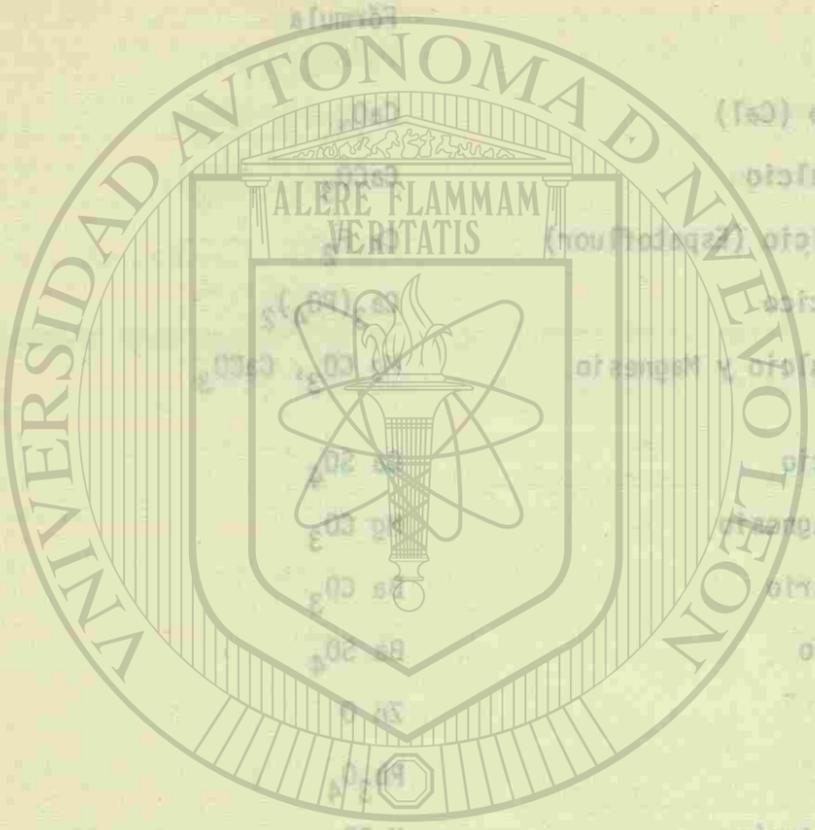
En seguida se presentan algunas listas de materias primas utilizadas

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Continuación Tabla 6.

Cloruro de potasio	KCl
Carbonato de Sodio	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
Sulfato de sodio	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Nitrato de sodio	Na NO <sub>3</sub>
Cloruro de sodio	NaCl
Criolita	AlF <sub>3</sub> · 3Na F
Oxido de Aluminio (Alumina)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Feldespatos	ver la siguiente tabla de algunos análisis químicos de estos productos.
Arenas Caoliníticas	
Oxido ferroso	Fe O
Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Oxido de Arsénico	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Oxido de Antimonio	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Antimoniato de potasio	KSbO <sub>3</sub>



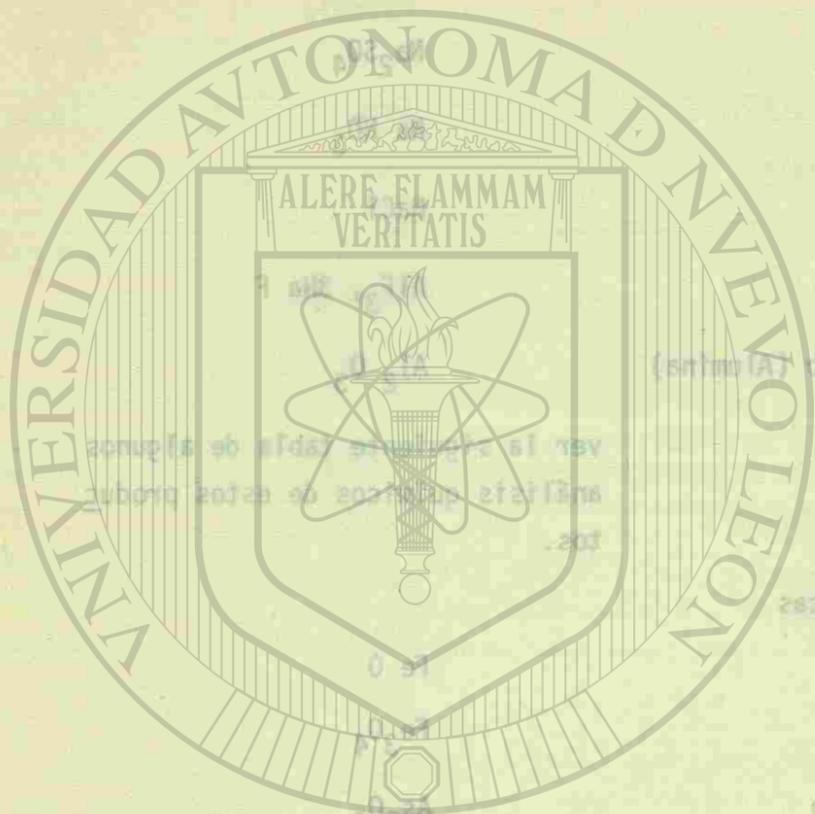
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Tabla 7.- Composición Química Típica de Feldespatos y arenas caolínicas (7).

Componente	Arenas Caolínicas				Feldespatos	
SiO <sub>2</sub>	87.07	93.71	98.71	69.98	65.64	64.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.50	4.01	0.59	19.39	18.04	21.73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.52	0.23	0.03	0.12	0.88	0.93
Mf O	0.20	6.60	0.08	- -	- -	0.78
Ca O	0.34	- -	- -	0.23	0.31	0.53
Na <sub>2</sub> O	2.30	1.40	0.53	2.47	4.49	10.08
K <sub>2</sub> O	2.30	1.40	0.53	12.92	10.65	1.48
Pérdida al fuego	2.07	0.20	0.18	0.24	- -	- -



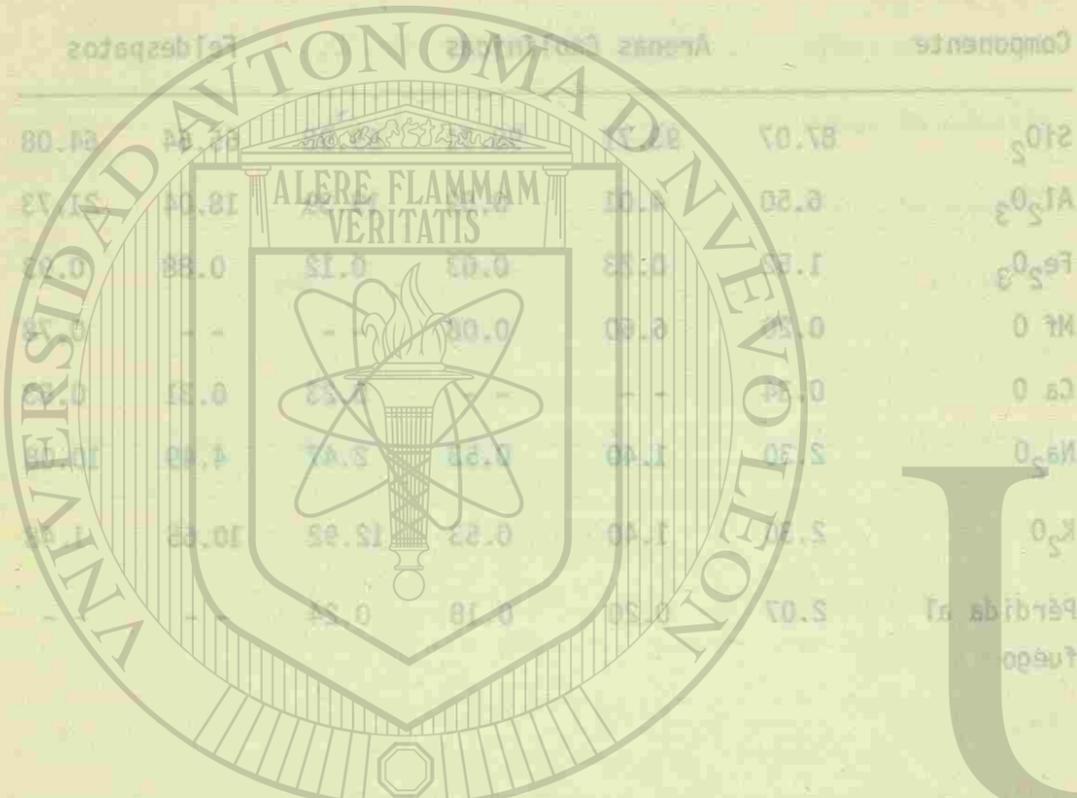
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



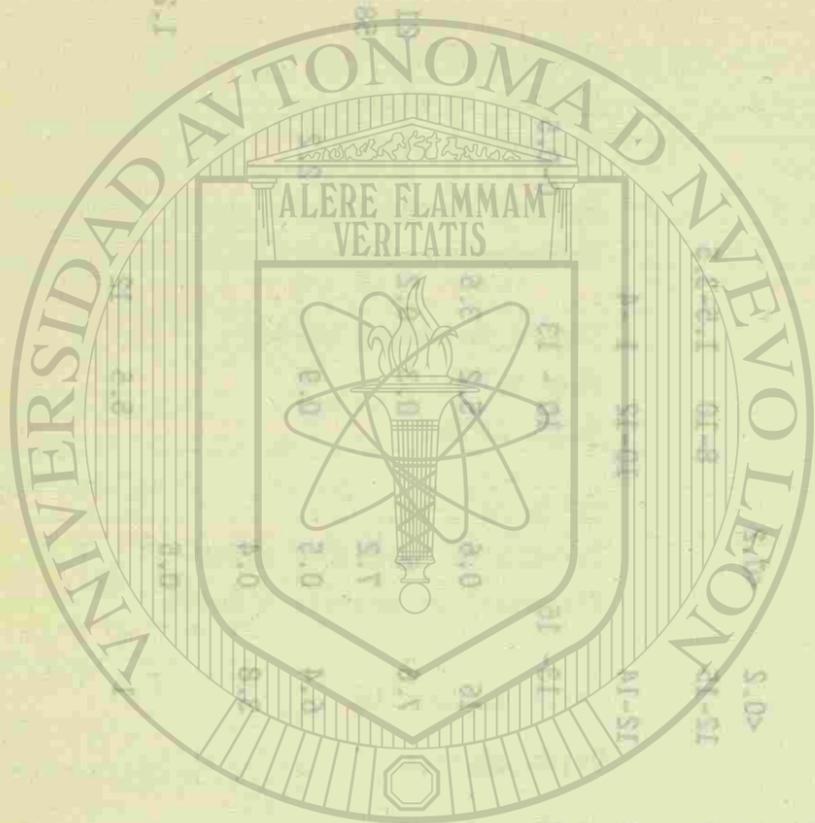
Tabla 8. Productos colorantes (7)

Colorantes	Materia Prima
Ag	Oxido de plata Nitrato de plata Cloruro de plata
Cds	Sulfuro de-cadmio Sulfuro de cadmio
C	Carbón de madera molido Coke molido Negro animal
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxido de cromo Cromato de potasio ó sodio Bicromato de potasio ó sodio
CoO	Oxido de cobalto
CuO	Oxido cúprico
Cu <sub>2</sub> O	Oxido cuproso
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxido de fierro Sulfato de fierro
Mn O	Oxido de Manganese (Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Permanganato de potasio
NiO	Oxido de niquel Hidroxido de niquel
Au	Cloruro de oro Púrpura de casius (Au + SnO <sub>2</sub> )
Se	Selenio Selenita de sodio
S	Flor de azufre
UO <sub>3</sub>	Uranato de sodio (Na <sub>2</sub> UO <sub>7</sub> .3M <sub>2</sub> O)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

No.	Designación	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	ZnO	PbO	SnO	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Li <sub>2</sub> O	R <sub>2</sub> O	Suma
1	vidrio de selenio	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0
2	vidrio de selenio	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0
3	vidrio de selenio	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0
4	vidrio de selenio	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0
5	vidrio de selenio	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0
6	vidrio de selenio	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0
7	vidrio de selenio	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0
8	vidrio de selenio	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0
9	vidrio de selenio	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0
10	vidrio de selenio	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0
11	vidrio de selenio	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0
12	vidrio de selenio	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0
13	vidrio de selenio	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0
14	vidrio de selenio	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0
15	vidrio de selenio	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0

d).- Efecto de la composición del vidrio sobre sus propiedades.

Ciertas propiedades mecánicas y ópticas del vidrio pueden ser modificadas por tratamientos térmicos y aquellas propiedades, las cuales tienen relación con la naturaleza de la superficie pueden variar de acuerdo al método de producción y su forma.

Sin embargo los vidrios son estructuras complejas de silicatos, sus propiedades, en general pueden ser deducidas de la naturaleza y cantidad de óxido de los elementos constituyentes, cada óxido influye de una manera particular sobre las propiedades del vidrio.

La mayor parte de los vidrios comerciales consisten de oxígeno como anión y los cationes pueden ser Si, B, P, Al, Ca, Mg, Fe, Pb, Ba, Zn, Na, K, ..., la interacción de estos cationes entre si y con el oxígeno lo que determina la estructura y propiedades del vidrio. En un cristal, el acomodo de los átomos sigue un patrón de forma regular, dejando espacios muy pequeños entre ellos, en cambio el vidrio tiene un acomodo irregular y presenta huecos entre los átomos los cuales son llenados con cationes que tienen un radio iónico relativamente grande y carga pequeña, Fig. 1,2.

Un método conveniente de caracterizar estos cationes es dividirlos en "formadores de vidrio", "modificadores" e "intermediarios", aquellos que forman parte del esqueleto básico son llamados "formadores" (Si, B, P), aquellos que se encuentran en los intersticios donde modifican las propiedades finales, son llamados "modificadores" (Ca, Mg, Na, K), otros elementos que actúan como intermediarios, correctivos y colorantes.

Formadores de vidrio

Un número sorprendente de materiales pueden formar vidrios en -

d) -- Efecto de la composición del vidrio sobre sus propiedades.

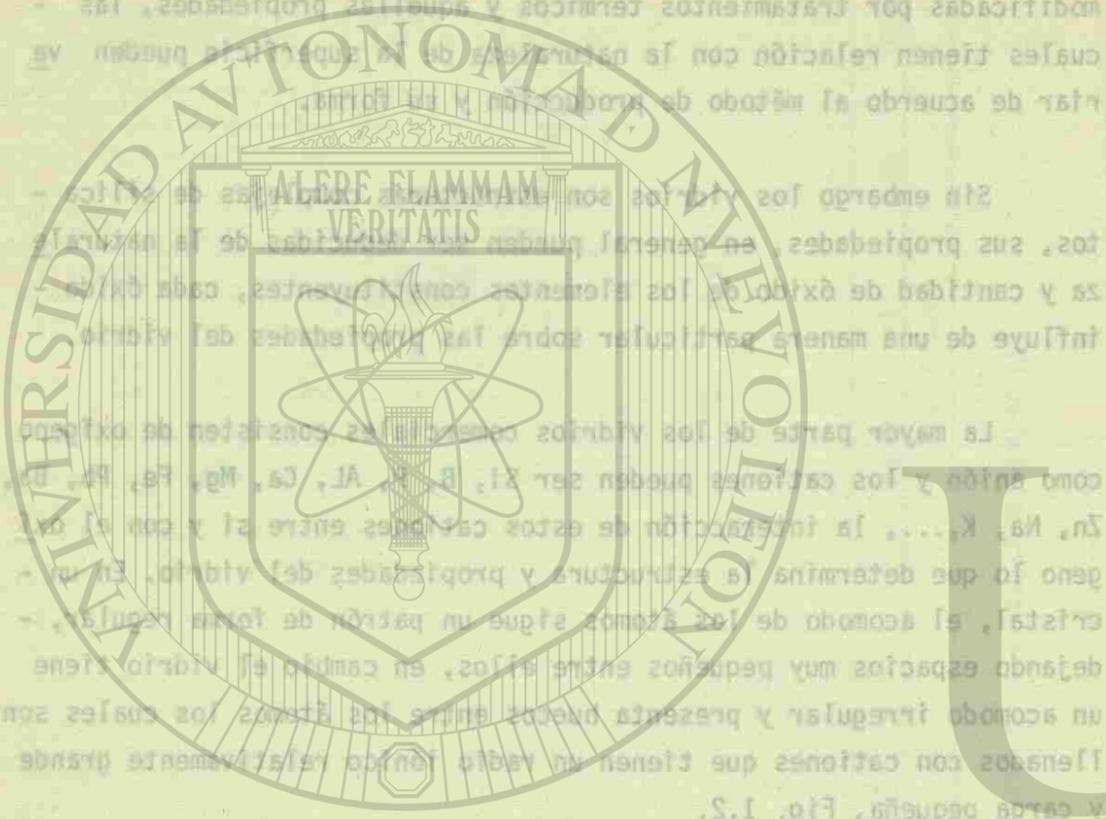
Ciertas propiedades mecánicas y ópticas del vidrio pueden ser modificadas por tratamientos térmicos y químicos. Las cuales tienen relación con la naturaleza de la sustancia que se trata de acuerdo al método de producción y la forma.

Si embargo los vidrios son homogéneos y transparentes en sus propiedades, en general pueden producirse vidrios de la naturaleza y cantidad de óxidos de los elementos con los cuales, cada óxido influye de una manera particular sobre las propiedades del vidrio. La mayor parte de los vidrios comerciales consisten de óxidos como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , etc. La interacción de estos cationes entre sí y con el  $\text{SiO}_2$  que determina la estructura y propiedades del vidrio, depende del acomodo de los átomos que sigue un patrón de forma regular, dejando espacios muy pequeños entre ellos, en cambio el vidrio tiene un acomodo irregular y presenta huecos entre los átomos los cuales son llenados con cationes que tienen un radio iónico relativamente grande y carga pequeña, Fig. 1.5.

Un método conveniente de caracterizar estos cationes es dividirlos en formadores de vidrio, "modificadores" e "interactivos". Los formadores de vidrio son los que forman parte del esqueleto básico del vidrio, como el  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , aquellos que se encuentran en los intersticios donde modifican las propiedades finales, son llamados "modificadores". (Cf. Fig. 1.5) Otros elementos que actúan como interactivos, como el  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , etc., actúan como interactivos, modificando las propiedades del vidrio.

Formadores de vidrio

Un número sorprendente de materiales pueden formar vidrios en



condiciones apropiadas. Sistemas vitreos simples a base de óxidos de sílice ó de boro, son de los encontrados más comunmente. Debido a sus ligaduras de tipo covalente, tienen una fuerte tendencia a polimerizarse y formar estructuras continuas. Estos cationes tienen pequeños radios iónicos, altas cargas y números de coordinación bajos por lo que están capacitados para formar óxidos vitreos simples.

Silice ( $\text{SiO}_2$ )

La silice es el material vitrificante por excelencia. En la gama de los vidrios industriales exclusivamente silíceos. Forma un campo de aplicación muy extendido, desde el 100% con el vidrio de cuarzo con vertido en vidrio industrial hasta  $\approx 50\%$  en ciertos vidrios. Los límites de vitrificación, acidez ó basicidad, son tan amplios que prácticamente no se oponen a la producción de un vidrio cuando se domina la temperatura.

El punto de fusión de la silice, de  $1710^\circ\text{C}$  hace difícil su fusión y por lo tanto la fabricación de vidrios de silice pura, pero el punto de fusión se puede abatir agregando fundentes que al reaccionar con la silice a altas temperaturas forman compuestos de mas bajo punto de fusión.

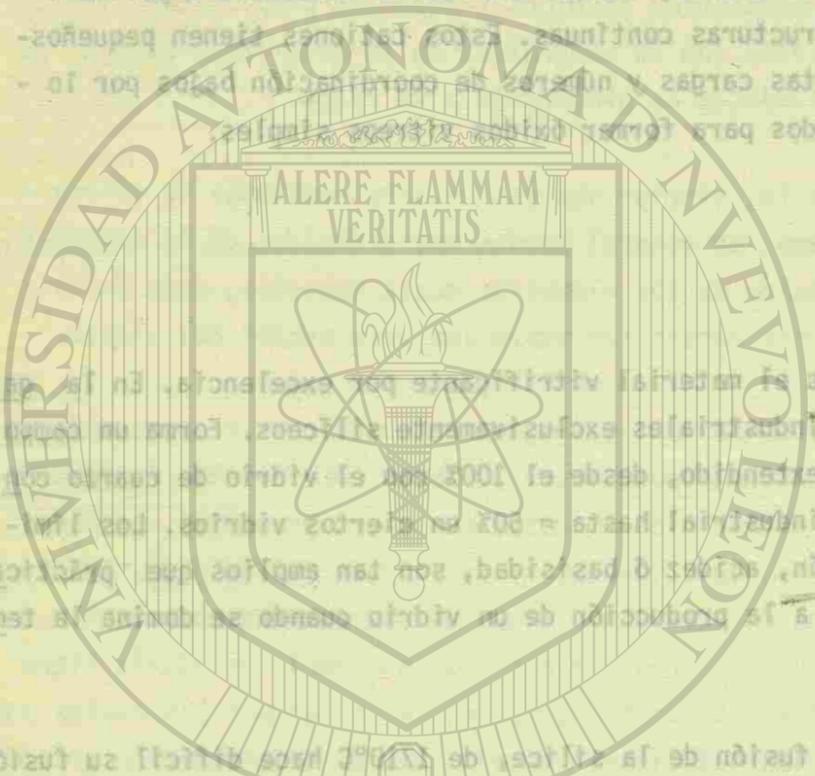
A pesar del extenso campo de empleo de este vitrificante, hay que tener en cuenta la acidez ó la basicidad de un vidrio, si nos acercamos al límite de basicidad hay una tendencia a la cristalización del  $\text{SiO}_2$ , es decir devitrificación, principal origen de los defectos de la fabricación del vidrio, si se llega por otro lado al límite de acidez se estaría expuesto o a la cristalización espontánea de la silice, o a la separación de esta por defecto de miscibilidad, lo cual produce un vidrio mas duro, más difícil de trabajar y de recalentar dentro de la puerta del horno.

condiciones apropiadas. Sistemas vitreos simples a base de óxidos de sílice ó de boro, son de los encontrados más comunes. Debido a sus ligaduras de tipo covalente, tienen una fuerte tendencia a polimerizarse y formar estructuras continuas. Estas últimas tienen pequeños radios iónicos, altas cargas y número de coordinación bajos por lo que están capacitados para formar enlaces fuertes.

La sílice es el material vítreo por excelencia. En la industria de los vidrios industriales exclusivamente silíceos, forma un grupo de importancia muy creciente, desde el 100% del vidrio de cuarzo que se vertido en vidrio industrial hasta a los vidrios de cuarzo. Los procesos de vitrificación, a pesar de su sencillez, son tan sencillos que prácticamente no se oponen a la producción de un vidrio cuando se domina la tecnología.

El punto de fusión de la sílice, de 1713°C hace difícil su fusión y por lo tanto la fabricación de vidrios de sílice pura, pero el punto de fusión se puede abatir agregando fundentes que al reaccionar con la sílice a altas temperaturas forman compuestos de más bajo punto de fusión.

A pesar del extremo punto de fusión de la sílice, el nos acercamos tener en cuenta la acción de la humedad de un vidrio, el nos acercamos al límite de estabilidad hay una tendencia a la cristalización del SiO<sub>2</sub> es decir devitrificación. principal origen de los defectos de la fabricación del vidrio, si se hace por otro lado el límite de estabilidad se encuentra puesto a la cristalización espontánea de la sílice, o a la separación de esta por defecto de miscibilidad, lo cual produce un vidrio más duro, más difícil de trabajar y de recalentar dentro de la puerta del horno.



En términos usuales, se dice que el exceso de sílice endurece el vidrio. Esta propiedad de endurecer el vidrio para muy pequeñas variaciones de concentración, en SiO<sub>2</sub>, es de gran sensibilidad, tal que un vidriero puede apreciar en el extremo de su caña una diferencia en concentración de 1-2 por ciento, de allí la necesidad de vigilar atentamente la concentración de sílice.

Otra propiedad principal de la sílice es su efecto sobre el coeficiente de dilatación, casi nulo para la sílice pura (5.5X10<sup>-7</sup>), en los vidrios de 50-60 por ciento de sílice tiene un valor de 120X10<sup>-7</sup> entre los 0 y 400°C lo cual los hace sensibles a todo cambio brusco de temperatura. El vidrio borosilicato-baja expansión No. 10 tabla 9, como ejemplo el Pyrex, tan notable por su resistencia al fuego y a las variaciones de temperatura, es el de más alta concentración de sílice de los vidrios industriales conocidos y todo el arte y la ciencia de realización de este compuesto de origen americano han resultado de estudiar los medios de conciliar una fusibilidad suficiente con una concentración de sílice lo más alto posible, lo cual se obtuvo por el empleo del óxido de boro (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

La sílice tiene además la propiedad de aumentar la resistencia elástica, dureza y resistencia eléctrica del vidrio.

En general, por lo tanto, como la sílice es el principal componente del vidrio, su concentración debe ser vigilado con gran precisión, los efectos de una pequeña variación en concentración de SiO<sub>2</sub> se hacen sentir sobre las propiedades, fusibilidad, tendencia a la devitrificación, viscosidad, dureza, resistencia elástica y sobre todo la calidad del vidrio desde el punto de vista de su trabajabilidad a mano, que es uno de los puntos más importantes de la técnica del vidrio y de la química práctica en vidriería.

En términos usuales, se dice que el exceso de sílice endurece el vidrio. Esta propiedad de endurecer el vidrio para muy pequeñas variaciones de concentración, en  $SiO_2$ , es de gran sensibilidad, tal que un vidrio puede aprectar en el extremo de un canal muy diferente en concentración de 1-2 por ciento de  $SiO_2$  la viscosidad de vidrio lentamente la concentración de sílice.

Otra propiedad peculiar de la sílice es su coeficiente de dilatación casi nulo para la sílice pura (2.5 x 10<sup>-7</sup> entre los 0 y 1000°C) lo cual los hace útiles a todo campo de temperatura. El vidrio borosilicato (ver expansión en tabla 9, como ejemplo el Pyrex, con un coeficiente de expansión de 3.3 x 10<sup>-7</sup> entre 0 y 1000°C) es de gran utilidad en la fabricación de vidrios industriales como los de todo el mundo. La ciencia de realización de este compuesto de origen americano ha sido estudiada por los mejores científicos y técnicos del mundo con una concentración de sílice lo más alta posible, lo cual se obtuvo por el empleo del óxido de boro ( $B_2O_3$ ).

La sílice tiene además la propiedad de aumentar la resistencia elástica, dureza y resistencia eléctrica del vidrio.

Óxido de Boro ( $B_2O_3$ )

El boro como forma de vidrio, consiste en unidades de  $BO_3$  donde los átomos de oxígeno están acomodados en forma triangular e inter-asalados en una estructura tridimensional (Fig. 3).

Debido a esta estructura el coeficiente de dilatación del óxido de boro reduce viscosidad, e incrementa la resistencia térmica. Esto ayuda a la fabricación de vidrios de alta resistencia y a la fabricación de vidrios de alta resistencia a la corrosión. La fundición de los vidrios de alta resistencia, como el Pyrex, requiere una gran cantidad de energía para fundirlos. Este fenómeno está siendo usado con ventaja en la fabricación de vidrios con baja expansión térmica, Fig. 3.

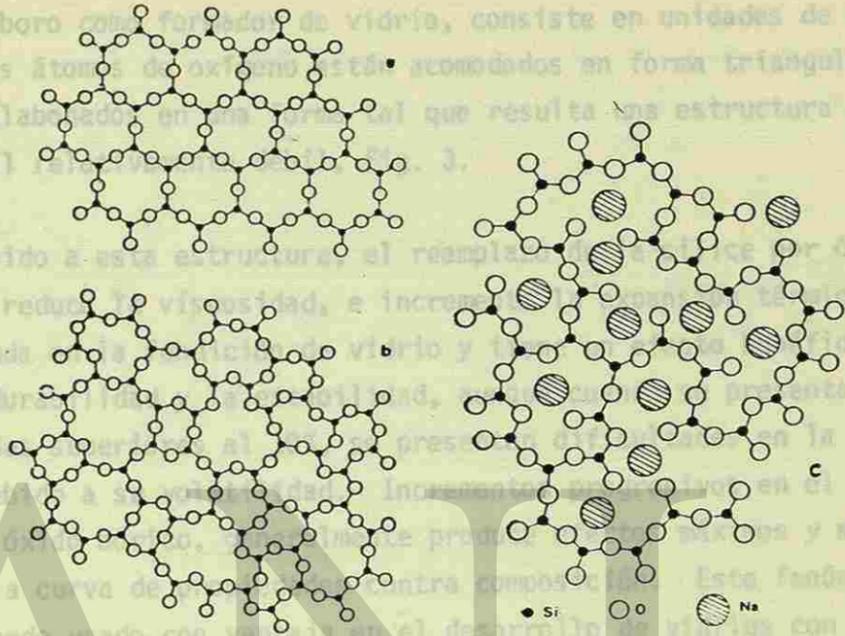


Fig. 2.- Esquema en dos dimensiones (9), representación (Zachariasen) de una estructura de  $A_2O_3$  a) un cristal b) un vidrio, c) representación (Warren) de la estructura de un vidrio soda-silice.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

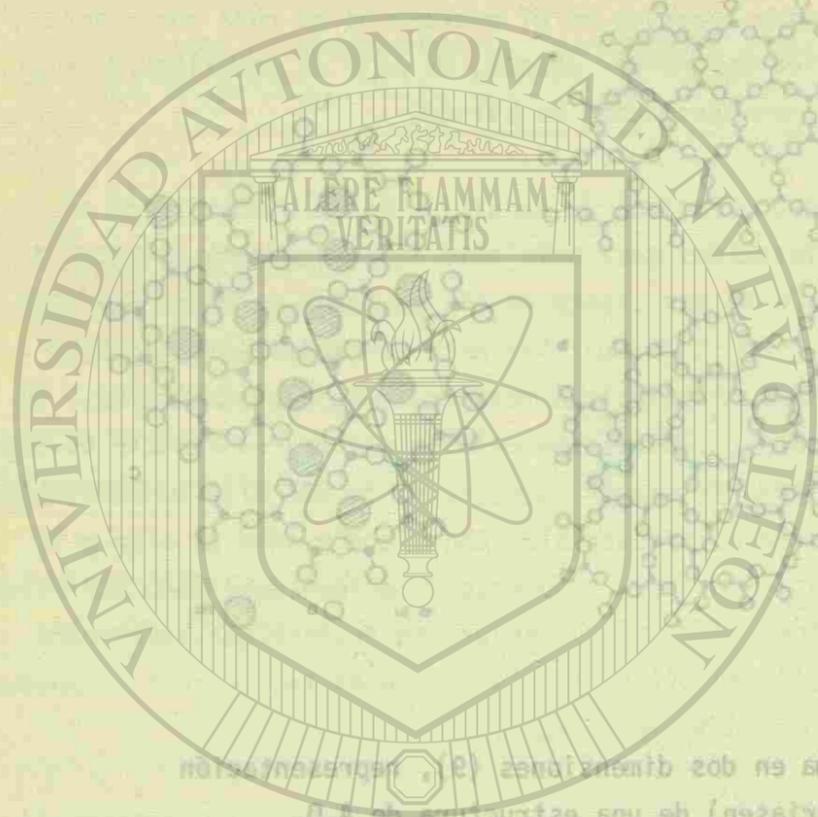


Fig. 3.- Estructura en dos dimensiones (a) representación (Zachariasen) de una estructura de  $B_2O_3$ .  
 (b) un cristal; (c) un vidrio; (d) representación (Warren) de la estructura de un vidrio soda-silíceo.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### Oxido de Boro ( $B_2O_3$ )

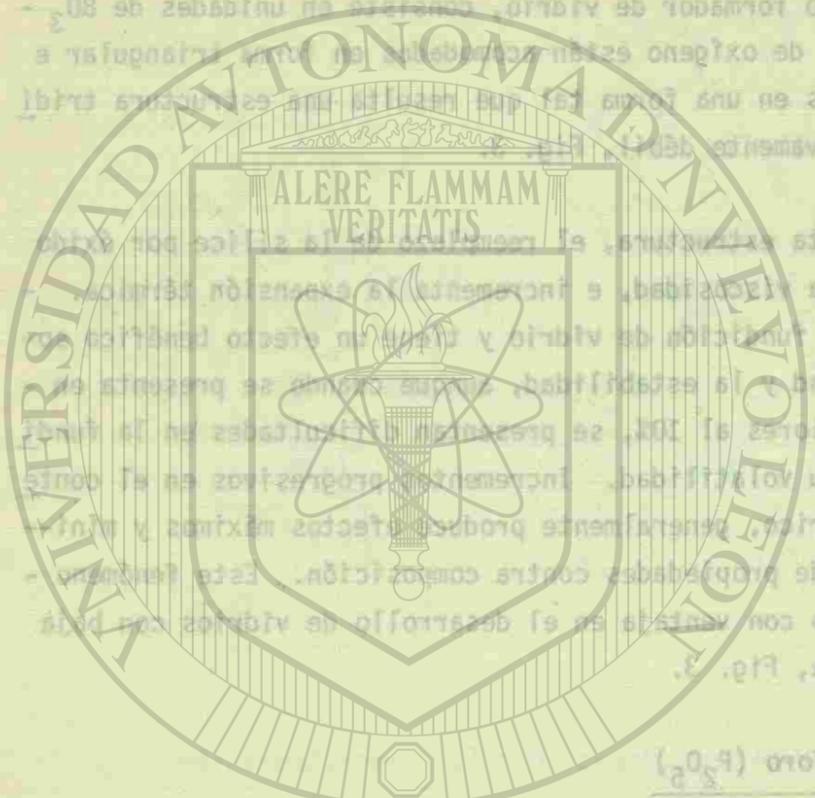
El boro como formador de vidrio, consiste en unidades de  $BO_3$  - donde los átomos de oxígeno están acomodados en forma triangular e inter-eslabonados en una forma tal que resulta una estructura tridimensional relativamente débil, Fig. 3.

Debido a esta estructura, el reemplazo de la silice por óxido de boro reduce la viscosidad, e incrementa la expansión térmica. - Esto ayuda en la fundición de vidrio y tiene un efecto benéfico sobre la durabilidad y la estabilidad, aunque cuando se presenta en cantidades superiores al 10%, se presentan dificultades en la fundición, debido a su volatilidad. Incrementos progresivos en el contenido de óxido bórico, generalmente produce efectos máximos y mínimos en la curva de propiedades contra composición. Este fenómeno - está siendo usado con ventaja en el desarrollo de vidrios con baja expansión térmica, Fig. 3.

### Pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ )

El papel del vitrificante fosfórico en el caso general de los vidrios y su influencia sobre las cualidades en caliente y en frío son tan poco conocidas, y como el uso de este cuerpo es tan excepcional, que recordaremos las dos principales razones de su empleo, como aumento del coeficiente de dilatación y como opacificante en los vidrios opalinos. Además se le atribuye la propiedad de dar lugar a vidrios muy brillantes.

Fig. 3 Estructura del óxido de Boro, borato de sodio y variación de la densidad y coeficiente de expansión con el incremento en concentración de  $H_2O$  (1).

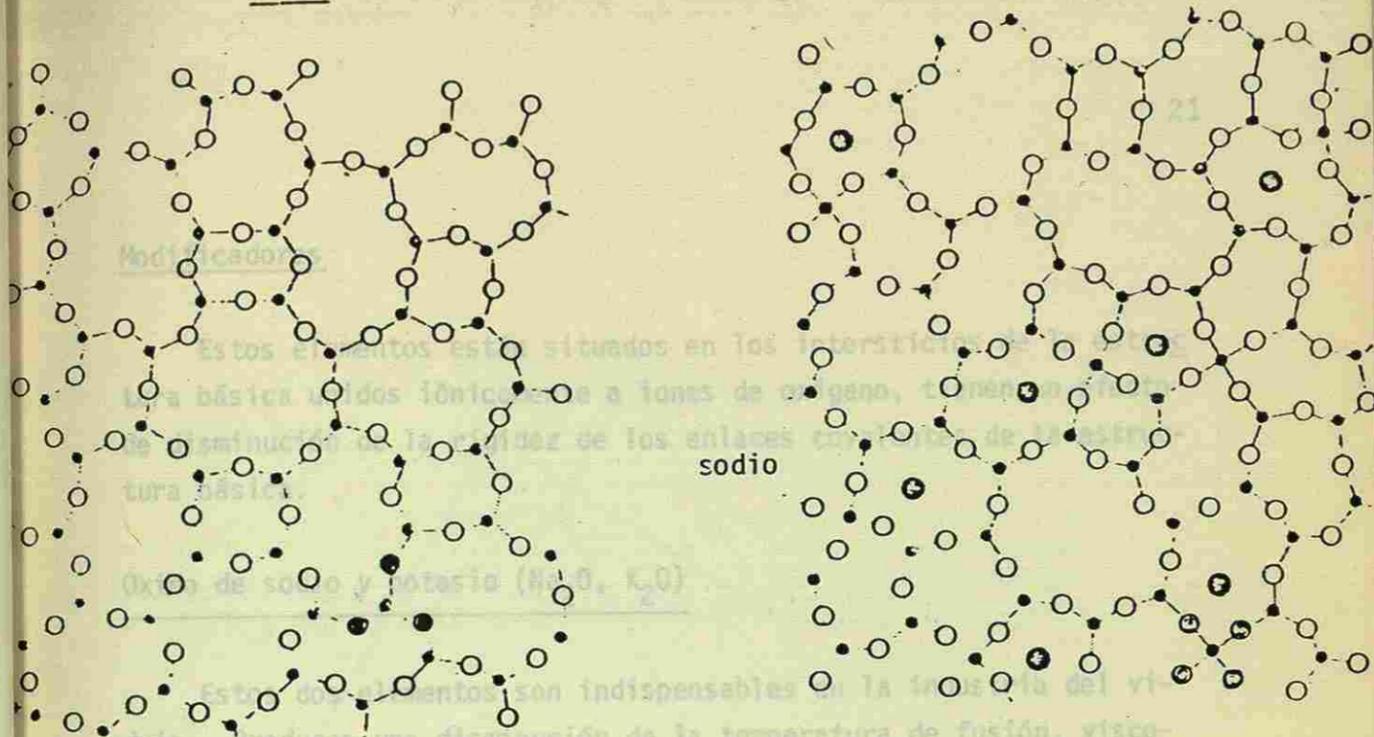
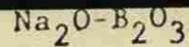


Oxido de Boro ( $B_2O_3$ )

El boro como formador de vidrio consiste en unidades de  $BO_3$  donde los átomos de oxígeno están coordinados en una forma tetraédrica inter-estacionados en una forma que resulta en estructuras tridimensionales relativamente débiles. Debido a esta estructura, el resultado de la acción del calor de boro reduce la viscosidad e incrementa la expansión térmica. Esto ayuda en la función de vidrio y también en otros aspectos de la durabilidad, la estabilidad, y una forma se presenta en cantidades superiores al 10%, se presentan dificultades en la fabricación, debido a su viscosidad. Incremento progresivo en el contenido de óxido bórico, generalmente produce efectos máximos y mínimos en la curva de propiedades contra composición. Este fenómeno está siendo usado con ventaja en el desarrollo de vidrios con alta expansión térmica, Fig. 3.

Pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ )

El papel del vitrificante fosfórico en el caso general de los vidrios y su influencia sobre las cualidades en caliente y en frío son bastante conocidas y como el uso de este elemento es tan extenso, que es necesario mencionar los dos principales efectos de su acción como aumento del coeficiente de dilatación y como opacificante en los vidrios opalinos. Además se le atribuye la propiedad de dar lugar a vidrios muy durables.



sodio

efecto sobre sus propiedades

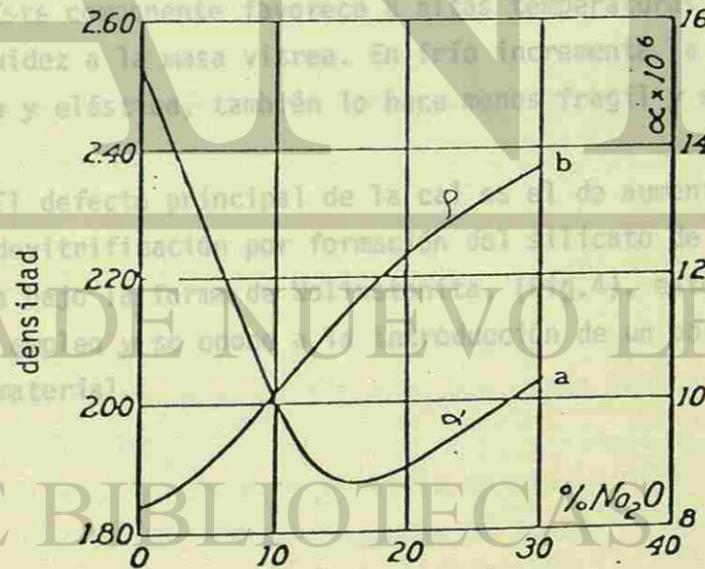


Fig. 3 Estructura del óxido de Boro, borato de sodio y variación de la densidad y coeficiente de expansión con el incremento en concentración de  $Na_2O$  (1).

### Modificadores

Estos elementos están situados en los intersticios de la estructura básica unidos iónicamente a iones de oxígeno, tienen un efecto de disminución de la rigidez de los enlaces covalentes de la estructura básica.

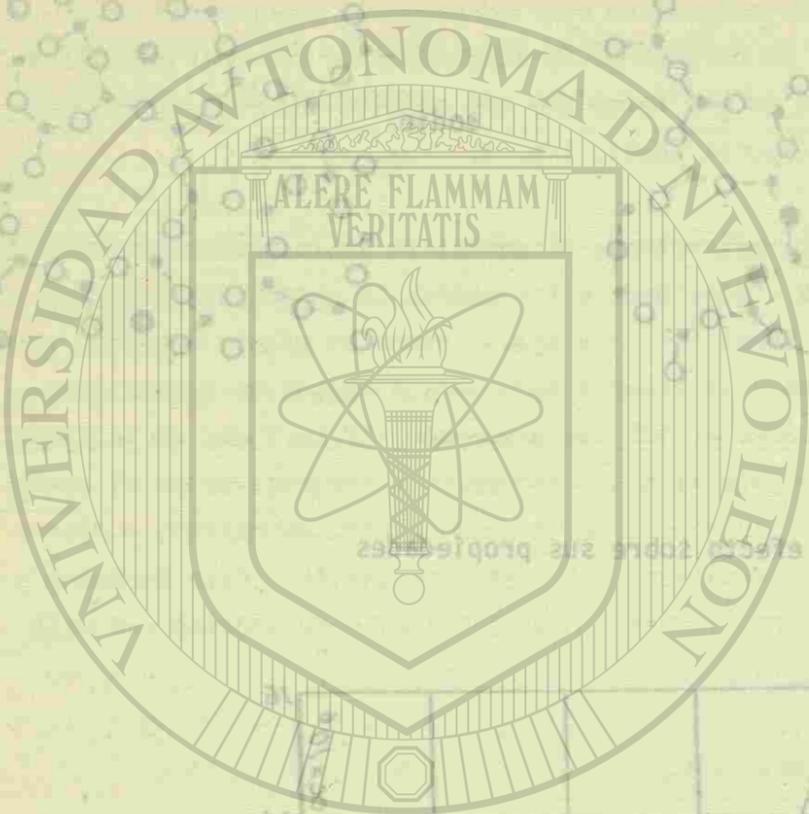
#### Oxido de sodio y potasio ( $\text{Na}_2\text{O}$ , $\text{K}_2\text{O}$ )

Estos dos elementos son indispensables en la industria del vidrio. Producen una disminución de la temperatura de fusión, viscosidad, durabilidad Química y la resistencia eléctrica e incrementan el coeficiente de expansión térmica.

#### Oxido de calcio ( $\text{CaO}$ )

Este componente favorece a altas temperaturas el afinado dando fluidez a la masa vitrea. En frío incrementa la resistencia mecánica y elástica, también lo hace menos fragil y soluble.

El defecto principal de la cal es el de aumentar la tendencia a la devitrificación por formación del silicato de calcio que cristaliza bajo la forma de Wollastonita, (Fig.4), esto es lo que limita su empleo y se opone a la introducción de un porcentaje alto de este material.



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Fig. 3. Estructura del óxido de boro, borato de sodio y variación de la densidad y coeficiente de expansión con el incremento en concentración de  $\text{Na}_2\text{O}$  (1).

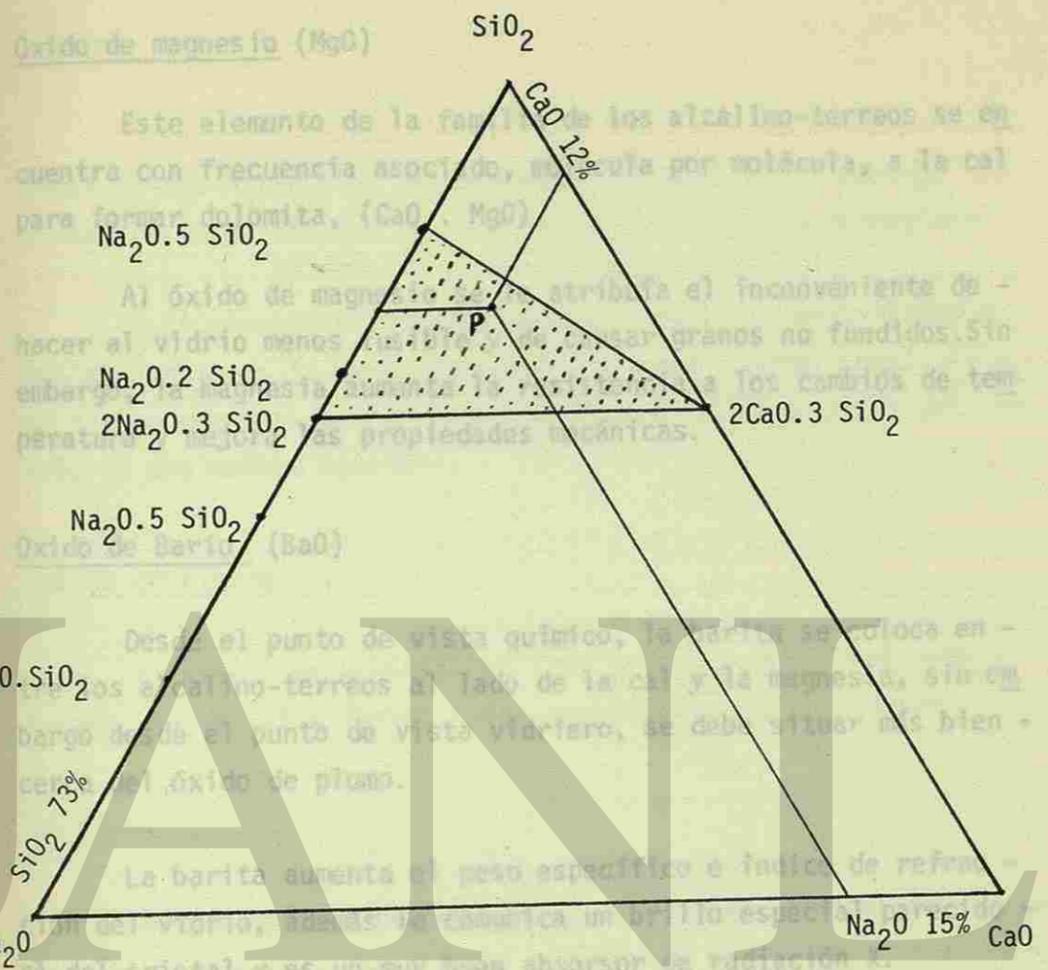
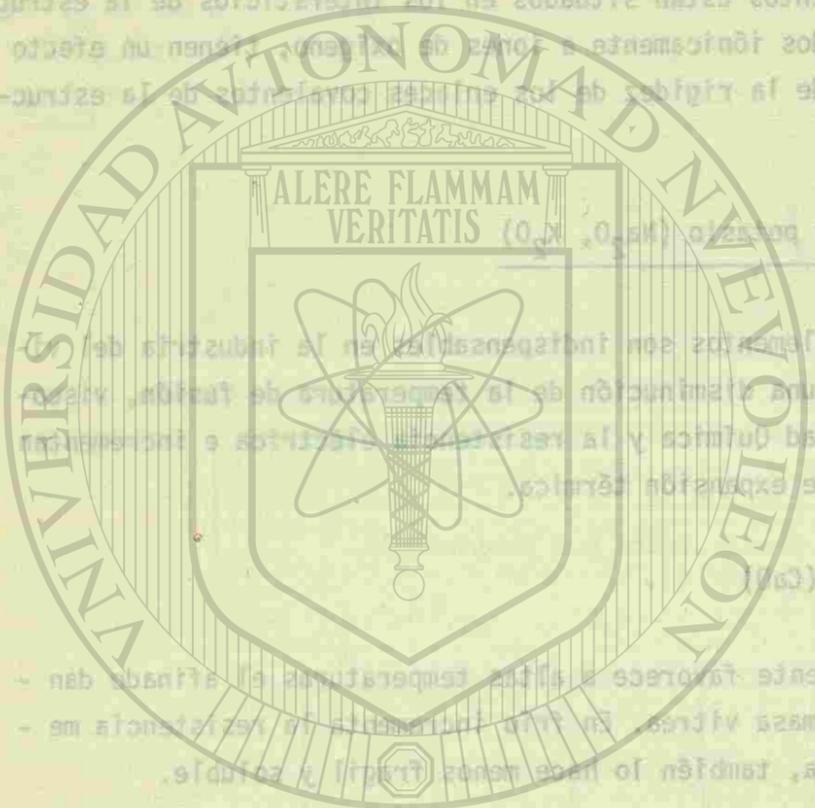


Fig 4.- diagrama ternario del sistema SiO<sub>2</sub> - Na<sub>2</sub>O- CaO, mostrando las estructuras cristalinas que puede formar el CaO y SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O y SiO<sub>2</sub>. la zona punteada presenta la mezcla ternaria para todos los vidrios sódico-cálcicos, el punto "P" indica la composición clásica de este sistema (8).



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Oxido de magnesio (MgO)

Este elemento de la familia de los alcalino-terreos se encuentra con frecuencia asociado, molécula por molécula, a la cal para formar dolomita, (CaO . MgO).

Al óxido de magnesio se le atribuí a el inconveniente de - hacer al vidrio menos fusible y de causar granos no fundidos. Sin embargo, la magnesia aumenta la resistencia a los cambios de temperatura y mejora las propiedades mecánicas.

Oxido de Bario (BaO)

Desde el punto de vista químico, la barita se coloca entre los alcalino-terreos al lado de la cal y la magnesia, sin embargo desde el punto de vista vidriero, se debe situar más bien cerca del óxido de plomo.

La barita aumenta el peso específico e índice de refracción del vidrio, además le comunica un brillo especial parecido al del cristal y es un muy buen absorbente de radiación X.

Oxido de Plomo (PbO)

El plomo se emplea en la técnica del cristal y en los vidrios especiales, produciéndose vidrios de alta densidad e índice de refracción, lo cual le dá el brillo característico, calidad que los hace muy adecuados para cristalería de mesa.

Este compuesto hace que el vidrio a altas temperaturas tenga una viscosidad muy baja lo cual favorece la afinación del mis-

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

La alúmina, cuyas propiedades refractarias son bien conocidas en los materiales refractarios, no parece sin embargo aumentar la infusibilidad del vidrio en pequeñas concentraciones.

Este compuesto favorece principalmente la durabilidad e impide ó retarda la devitrificación, y además puede sustituir a la cal en pequeñas proporciones mejorando la resistencia del vidrio de una manera sensible.

Oxidos de Hierro

El fierro se presenta en tres formas, -FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> y cada una de estas formas tiene propiedades muy diferentes.

Germanio GeO<sub>2</sub>

Este compuesto puede clasificarse a lado de los vitrificantes. El índice de refracción es más grande que el de silice y además tiene un coeficiente de absorción de rayos ultravioleta muy grande.

Arsénico y Antimonio

Estos elementos se oxidan fácilmente, dando lugar a productos muy volátiles, que homogenizan al vidrio, favoreciendo de esta manera la afinación del mismo.

Oxido de magnesio (MgO)

Este elemento de la familia de los alcalino-terreos se encuentra con frecuencia asociado, más bien con cal, para formar dolomita (CaO . MgO).

Al óxido de magnesio se le atribuye la propiedad de hacer al vidrio menos susceptible a la devitrificación. Sin embargo, la magnesia aumenta la resistencia a los cambios de temperatura y mejora las propiedades mecánicas.

Oxido de Bario (BaO)

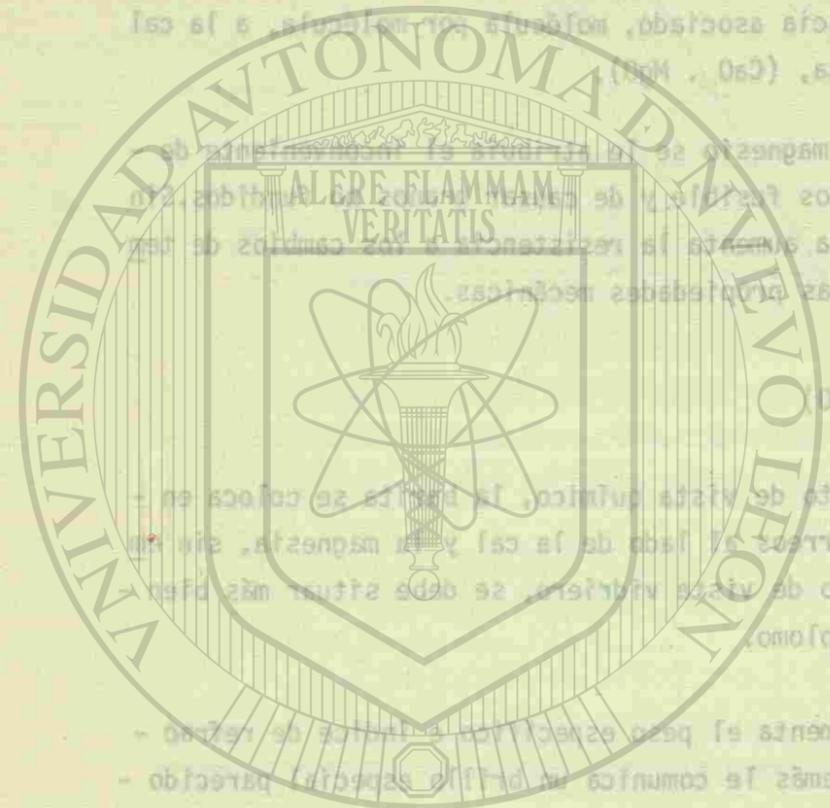
Desde el punto de vista químico, la barita se coloca entre los alcalino-terreos al lado de la cal y la magnesia. Sin embargo desde el punto de vista físico, se encuentra más bien cerca del óxido de plomo.

La barita aumenta el peso específico y reduce el coeficiente de expansión del vidrio, además le comunica un coeficiente de refracción X.

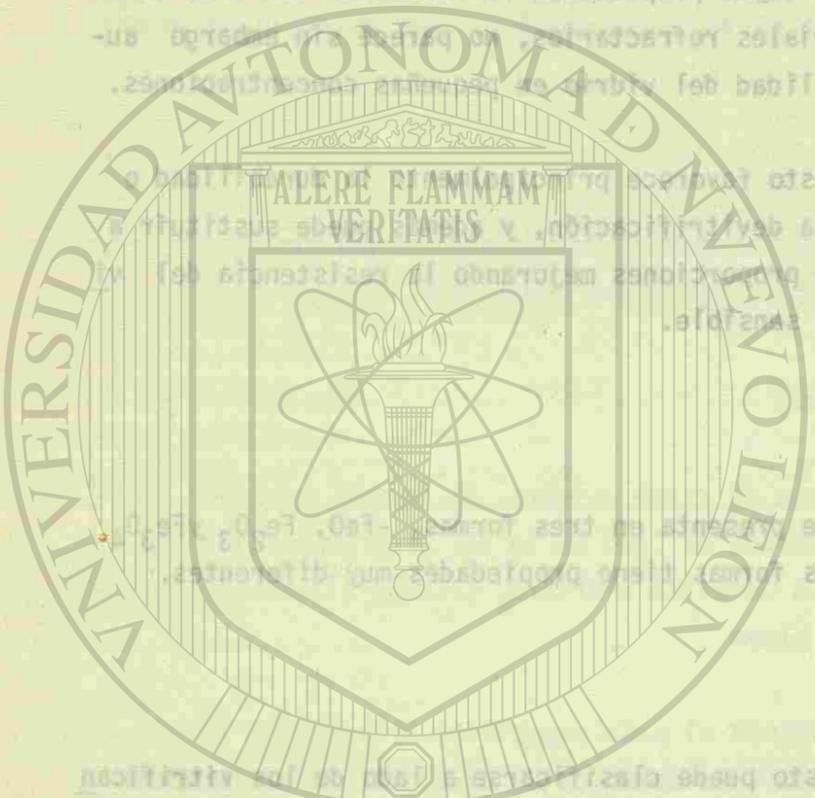
Oxido de Plomo (PbO)

El plomo se emplea en la técnica del cristal y en los vidrios especiales, produciéndose vidrios de alta densidad e índice de refracción, lo cual le da un brillo característico, cualidad que se hace muy recordada para cristales de lujo.

Este compuesto hace que el vidrio a altas temperaturas sea una viscosidad muy baja lo cual favorece la afinación del mismo.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECA Y ARCHIVO

Compuestos fluorados

Los compuestos fluorados tienen propiedades fundentes muy enérgicas, sin embargo no es muy recomendable debido al desprendimiento de fluor. Además tiene también la propiedad de opacificar los vidrios dándoles un aspecto lechoso, como en la opalina.

Colorantes

Los óxidos metálicos pueden proporcionar casi todos los colores del espectro, por simple disolución en el vidrio por fusión. Solo las tonalidades de rojo eran difíciles de obtener cuando se obtenían a partir del oro y cobre. Pero el empleo muy reciente y cada vez más extendido del selenio con el sulfuro de cadmio ha dado un color rojo muy estable que se atribuye a la formación de un sulfoseleniuro de cadmio.

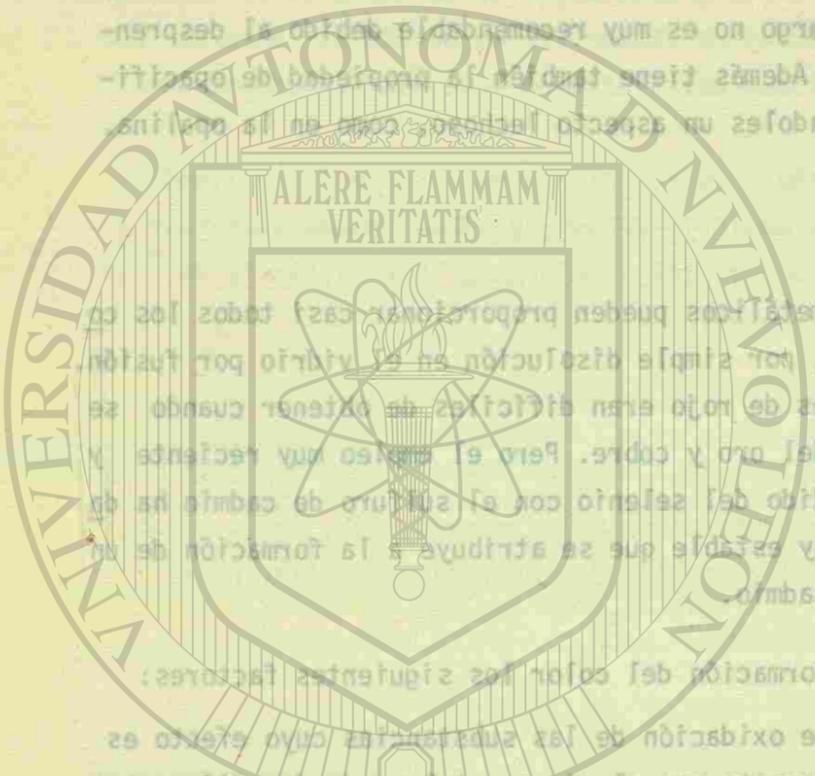
Influyen sobre la formación del color los siguientes factores:

- 1.- El grado de oxidación de las sustancias cuyo efecto es evidente, puesto que el mismo metal puede dar diferentes estados de oxidación, así se puede obtener un color azul ó verde con el cobre, verde ó amarillo con el fierro, rosa o violeta con el manganeso, verde o rosa con el cromo.
- 2.- Una atmósfera oxidante ó reductora en el horno puede hacer que el estado de oxidación de algún metal cambie, - por lo que la coloración del vidrio también cambiaría.
- 3.- La naturaleza del vidrio. Ciertos cuerpos totalmente incoloros modifican las coloraciones debidas a los óxidos metálicos. La alúmina intensifica la coloración debida al fierro, la cal y la potasa intervienen también dando



Compuestos fluorados

Los compuestos fluorados tienen propiedades fundentes muy energéticas, sin embargo no es muy recomendable debido al desprendimiento de fluor. Además tiene también la propiedad de opacificar los vidrios dándoles un aspecto lacado en la opalina.



Colorantes

Los óxidos metálicos pueden proporcionar casi todos los colores del espectro, por simple disolución en el vidrio por fusión. Solo las tonalidades de rojo y naranja son difíciles de obtener cuando se obtienen a partir del oro y cobre. Pero el hierro muy reciente cada vez más extendido del selenio con el sulfuro de cadmio ha dado un color rojo muy estable que se atribuye a la formación de un sulfoselenuro de cadmio.

Influyen sobre la formación del color los siguientes factores: 1.- El grado de oxidación de las sustancias cuyo efecto es evidente, puesto que el mismo metal puede dar diferentes estados de oxidación, así se puede obtener un color azul

o verde con el cobre, verde o amarillo con el hierro, rojo

o violeta con el manganeso, verde o rosa con el cromo.

2.- Una atmósfera oxidante o reductora en el horno puede hacer que el estado de oxidación de algún metal cambie, por lo que la coloración del vidrio también cambia.

3.- La naturaleza del vidrio. Ciertos óxidos metálicos en ciertas proporciones dan colores más intensos que otros.

La alumina intensifica la coloración de los vidrios metálicos. La potasa interviene también dando al hierro, la cal y la sosa intervienen también dando

COLORANTES Y COLORACIONES DE VIDRIOS DE NATURALEZA (7).

colores más intensos cuando aumenta su concentración, luego dependiendo de la naturaleza del vidrio la tonalidad de los colores puede cambiar, ver tabla 10.

La Fig. 5 muestra el efecto que tienen los principales componentes del vidrio sobre sus propiedades.

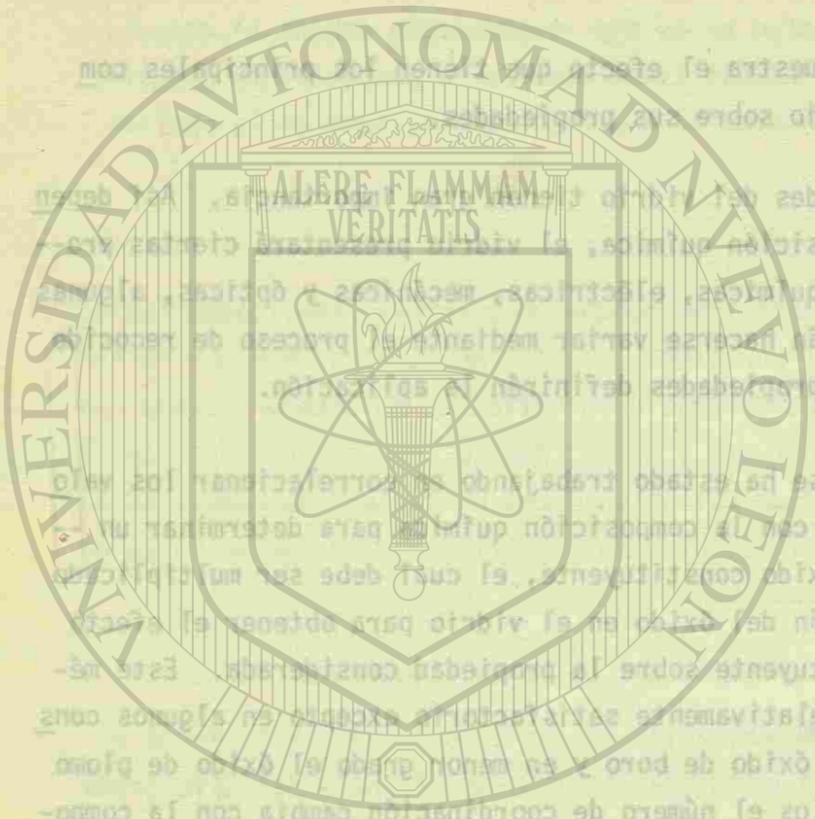
Las propiedades del vidrio tienen gran importancia. Así dependiendo de la composición química, el vidrio presentará ciertas propiedades físicas, químicas, eléctricas, mecánicas y ópticas, algunas de las cuales podrán hacerse variar mediante el proceso de recocido y templado, estas propiedades definirán la aplicación.

Ultimamente se ha estado trabajando en correlacionar los valores de propiedades con la composición química para determinar un factor para cada óxido constituyente, el cual debe ser multiplicado por la concentración del óxido en el vidrio para obtener el efecto aditivo del constituyente sobre la propiedad considerada. Este método empírico es relativamente satisfactorio excepto en algunos constituyentes como el óxido de boro y en menor grado el óxido de plomo debido a que en ellos el número de coordinación cambia con la composición.

La tabla 11 muestra las propiedades de mayor interés de los vidrios comerciales cuya composición se puede ver en la tabla 9.

Las propiedades del vidrio cambian con la composición y la temperatura (9), sin embargo no haremos énfasis en explicar como varía la propiedad con estos parámetros.

La propiedad física de viscosidad será tratada en detalle en el capítulo II (Reología del vidrio) de este trabajo.



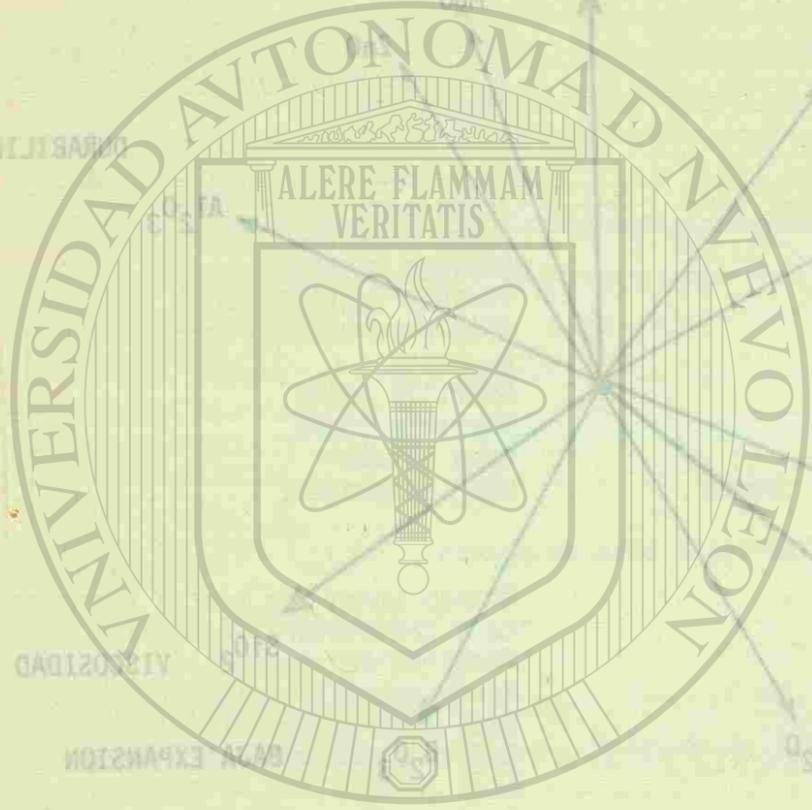
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

TABLA 10. COLORANTES Y COLORACIONES OBTENIDAS EN VIDRIOS DE DIFERENTE NATURALEZA (7).

Vidrios a base de sosa	
Materia colorante	Coloración
Antimonio de plomo	Blanca opaca
Oxido de plata	Amarilla o amarillo-anaranjada
Oxido de cromo	Verde amarillo hierba
Oxido de cobalto	Azul violáceo
Oxido cuproso	Rojo púrpura amarillento
Oxido cúprico	Azul celeste girando a verde
Oxido ferroso	Verde azul
Magnetita	Verde botella
Oxido de manganeso	Violeta rojizo
Oxido de níquel	Violeta amarillento
Oxido de oro	(Oro precipitado) marrón y azul
Azufre y carbono	Amarillo
Oxido de uranio	Amarillo verde
Sulfuro de cadmio	Amarillo limón
Selenio	Rosa salmón
Selenio y sulfuro de cadmio	Rosa anaranjado
Vidrios a base de potasa	
Antimonio de plomo	Blanco opaco (se vuelve transparente a temperatura elevada).
Oxido de plata	Amarillo anaranjado
Oxido de cromo	Verde amarillo brillante
Oxido de cobalto	Azul algo verde brillante
Oxido cuproso	Rojo púrpura amarillo
Oxido cúprico	Azul celeste muy brillante
Oxido ferroso	Verde azul, casi azul.
Magnetita	Verde botella amarillo
Oxido de manganeso	Violeta amatista brillante
Oxido de níquel	Violeta amatista
Oxido de oro	Rojo y rosa
Azufre y carbono	Amarillo de oro
Oxido de uranio	Amarillo
Vidrios a base de plomo	
Antimonio de plomo	Amarillo opaco; agregando hierro es más obscuro.
Oxido de cromo	Amarillo rojizo
Oxido de cobalto	Azul
Oxido cuproso	Rojo púrpura sangre
Oxido cúprico	Verde
Oxido ferroso	Amarillo verde
Oxido de manganeso	Violeta rojizo
Oxido de oro	Rojo y rosa
Azufre y carbono	Negro
Oxido de uranio	Amarillo topacio

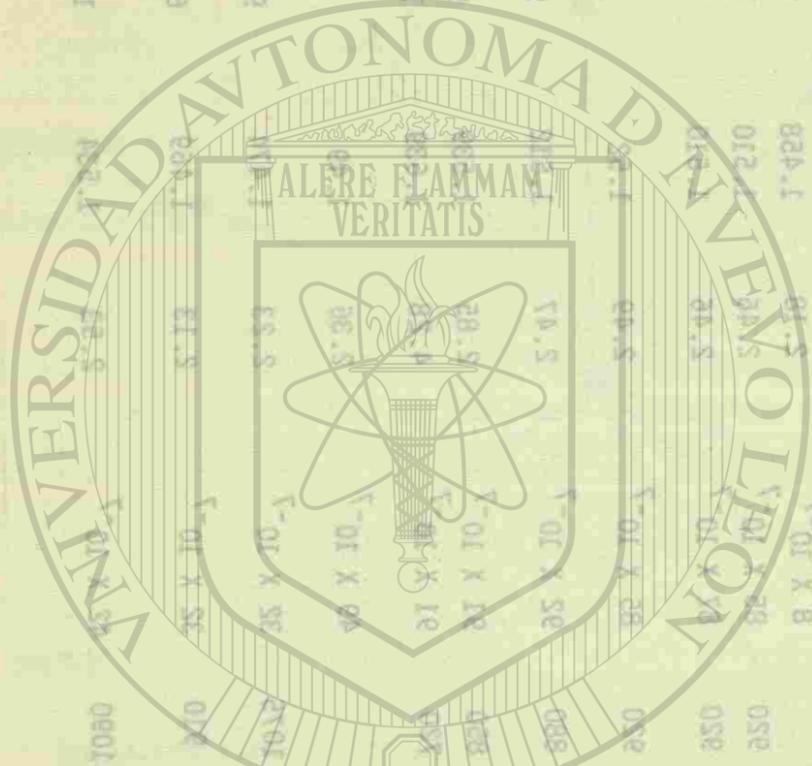




UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

TABLA 11. Propiedades de vidrios comerciales (9).  
(para composición ver tabla 9)

No.	Designación	Datos de viscosidad Strain Anneal Soft Flow Pt, °C Pt, °C Pt, °C Pt, °C	Coef. de expansión, °C 0 a 300°C	Densidad gr/cc.	Índice de ref. (D)	Módulo de young (psi).
1	vidrio de sílica	1070 1140 1667	$5.5 \times 10^{-7}$	2.20	1.458	$10 \times 10^6$
2	vidrio de sílica 96%	820 910 1500	$8 \times 10^{-7}$	2.18	1.458	$9.7 \times 10^6$
3	vidrio plano (soda-lime)	505 548 730 920	$85 \times 10^{-7}$	2.46	1.510	$10 \times 10^6$
4	vidrio para cristalería (soda-lime)	510 553 735 920	$87 \times 10^{-7}$	2.46	1.510	$10 \times 10^6$
5	vidrio para envases (soda-lime)	505 548 730 920	$85 \times 10^{-7}$	2.49	1.52	$10 \times 10^6$
6	vidrios para focos elec- tricos (soda-lime)	470 510 696 880	$92 \times 10^{-7}$	2.47	1.512	$9.8 \times 10^6$
7	vidrio de plomo	395 435 626 850	$91 \times 10^{-7}$	2.85	1.539	$9.0 \times 10^6$
8	vidrio de plomo (alto plomo)	395 430 580 720	$91 \times 10^{-7}$	4.28	1.639	$7.6 \times 10^6$
9	vidrio aluminio-boro- silicato	540 580 795	$49 \times 10^{-7}$	2.36	1.49	
10	Borosilicato-baja ex- pansión	520 565 820 1075	$32 \times 10^{-7}$	2.23	1.474	$9.8 \times 10^6$
11	Borosilicato-pérdidas electricas bajas	455 495 910	$32 \times 10^{-7}$	2.13	1.469	$6.8 \times 10^6$
12	Alumino silicato	670 715 915 1090	$42 \times 10^{-7}$	2.53	1.534	$12.7 \times 10^6$



No.	Descripción	Temperatura (°C)	Viscosidad (poise)	Temperatura (°C)	Viscosidad (poise)
15	Vidrio ordinario	1500	1.5 x 10 <sup>10</sup>	1500	1.5 x 10 <sup>10</sup>
17	Vidrio electrolítico	1400	2.8 x 10 <sup>9</sup>	1400	2.8 x 10 <sup>9</sup>
18	Vidrio borosilicato-báritico	1300	3.8 x 10 <sup>8</sup>	1300	3.8 x 10 <sup>8</sup>
19	Vidrio borosilicato-potásico	1200	4.8 x 10 <sup>7</sup>	1200	4.8 x 10 <sup>7</sup>
20	Vidrio aluminopotasico	1100	5.8 x 10 <sup>6</sup>	1100	5.8 x 10 <sup>6</sup>
21	Vidrio aluminopotásico	1000	6.8 x 10 <sup>5</sup>	1000	6.8 x 10 <sup>5</sup>
22	Vidrio aluminopotásico (alto contenido)	900	7.8 x 10 <sup>4</sup>	900	7.8 x 10 <sup>4</sup>
23	Vidrio aluminopotásico (bajo contenido)	800	8.8 x 10 <sup>3</sup>	800	8.8 x 10 <sup>3</sup>
24	Vidrio aluminopotásico (intermedio)	700	9.8 x 10 <sup>2</sup>	700	9.8 x 10 <sup>2</sup>
25	Vidrio aluminopotásico (bajo contenido)	600	1.08 x 10 <sup>1</sup>	600	1.08 x 10 <sup>1</sup>
26	Vidrio aluminopotásico (bajo contenido)	500	1.18 x 10 <sup>0</sup>	500	1.18 x 10 <sup>0</sup>
27	Vidrio aluminopotásico (bajo contenido)	400	1.28 x 10 <sup>-1</sup>	400	1.28 x 10 <sup>-1</sup>
28	Vidrio aluminopotásico (bajo contenido)	300	1.38 x 10 <sup>-2</sup>	300	1.38 x 10 <sup>-2</sup>
29	Vidrio aluminopotásico (bajo contenido)	200	1.48 x 10 <sup>-3</sup>	200	1.48 x 10 <sup>-3</sup>
30	Vidrio aluminopotásico (bajo contenido)	100	1.58 x 10 <sup>-4</sup>	100	1.58 x 10 <sup>-4</sup>
31	Vidrio aluminopotásico (bajo contenido)	0	1.68 x 10 <sup>-5</sup>	0	1.68 x 10 <sup>-5</sup>
32	Vidrio aluminopotásico (bajo contenido)	0	1.78 x 10 <sup>-6</sup>	0	1.78 x 10 <sup>-6</sup>
33	Vidrio aluminopotásico (bajo contenido)	0	1.88 x 10 <sup>-7</sup>	0	1.88 x 10 <sup>-7</sup>
34	Vidrio aluminopotásico (bajo contenido)	0	1.98 x 10 <sup>-8</sup>	0	1.98 x 10 <sup>-8</sup>
35	Vidrio aluminopotásico (bajo contenido)	0	2.08 x 10 <sup>-9</sup>	0	2.08 x 10 <sup>-9</sup>
36	Vidrio aluminopotásico (bajo contenido)	0	2.18 x 10 <sup>-10</sup>	0	2.18 x 10 <sup>-10</sup>
37	Vidrio aluminopotásico (bajo contenido)	0	2.28 x 10 <sup>-11</sup>	0	2.28 x 10 <sup>-11</sup>
38	Vidrio aluminopotásico (bajo contenido)	0	2.38 x 10 <sup>-12</sup>	0	2.38 x 10 <sup>-12</sup>
39	Vidrio aluminopotásico (bajo contenido)	0	2.48 x 10 <sup>-13</sup>	0	2.48 x 10 <sup>-13</sup>
40	Vidrio aluminopotásico (bajo contenido)	0	2.58 x 10 <sup>-14</sup>	0	2.58 x 10 <sup>-14</sup>

CAPITULO II. REOLOGIA DEL VIDRIO

La reología es, por definición, la ciencia que estudia la de formación y el flujo de la materia. Así, el campo de la reología se extiende, desde la mecánica de los fluidos newtonianos por una parte, hasta la elasticidad de Hooke por la otra. La región comprendida entre ambas partes corresponde a la deformación y flujo de los materiales viscoelásticos.

El comportamiento reológico del vidrio, en estado estable e inestable recibe mucha atención en círculos académicos y de manufactura, debido a que es una variable muy importante tanto para fijar las condiciones de operación como para diseñar el equipo del proceso de fabricación de artículos de vidrio.

Datos sobre el comportamiento reológico del vidrio en particular sobre viscoelasticidad, son sumamente escasos en la literatura, ello motivó el proyecto de diseño y construcción de un Extensiómetro para vidrio fundido, que nos dé información sobre las características viscoelásticas del material, de tal manera que podamos inferir su modelo de comportamiento.

a) viscosidad

La ley de Newton de viscosidad establece que el esfuerzo cortante (fuerza por unidad de área) es proporcional al gradiente negativo de la velocidad local, ( $\frac{dv_x}{dy}$ ).

$$\tau_{yx} \propto \frac{dv_x}{dy} \tag{1}$$

Si  $\eta$  es la constante de proporcionalidad, el fluido se comporta como un fluido newtoniano.

La reología es, por definición, la ciencia que estudia la de formación y el flujo de la materia. Así, en el caso de la reología se extiende, desde la mecánica de los fluidos newtonianos por una parte, hasta la elasticidad de sólidos por otra, la reología comprende entre ambas partes, el estudio de la formación y flujo de los materiales viscoelásticos.

El comportamiento reológico del vidrio en estado estable, en estado estable recibe mucha atención en estudios académicos y de investigación, debido a que es una variable muy importante tanto para fijar las condiciones de operación como para diseñar el equipo del proceso de fabricación de artículos de vidrio.

Datos sobre el comportamiento reológico del vidrio en estado estable sobre viscoelasticidad, son sumamente escasos en la literatura, esto motivó el proyecto de diseño y construcción de un experimento para vidrio fundido, para proporcionar sobre las características viscoelásticas del material de tal manera que podamos inferir su modelo de comportamiento.

La ley de Newton de viscosidad establece que el esfuerzo cortante (fuerza por unidad de área) es proporcional al gradiente negativo de la velocidad (es decir,  $\tau_{yx} = \mu \frac{dv_x}{dy}$ ).

Donde la constante de proporcionalidad es definida como viscosidad  $\mu$ , por lo que la Ley de Newton de viscosidad es.

$$\tau_{yx} = \mu \frac{dv_x}{dy} = \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

De acuerdo con la Ley de Newton de viscosidad (Ecuación (2)) al representar gráficamente  $\tau_{yx}$  vs  $\dot{\gamma}$  para un fluido determinado, debe obtenerse una línea recta que pasa por el origen de coordenadas y cuya pendiente es la viscosidad del fluido a una cierta temperatura y presión (Fig. 6). En efecto la experiencia demuestra que para todos los gases y los líquidos homogéneos,  $\tau_{yx}$  es directamente proporcional a ( $\dot{\gamma}$ ). Sin embargo, existen algunos materiales industrialmente importantes que no se comportan de acuerdo con la Ecuación (2), a ellos se les conoce desde el punto de vista reológico como fluidos "no newtonianos", Fig.6.

El comportamiento reológico, en estado estacionario de la mayor parte de los fluidos puede representarse mediante una forma generalizada de la Ecuación (2).

$$\tau_{yx} = \eta \dot{\gamma} \quad (3)$$

$$\eta = \eta(\dot{\gamma})$$

en la que  $\eta$  es la "viscosidad aparente" y es constante solo para un valor de  $\dot{\gamma}$ , que le corresponde un valor de  $\tau_{yx}$ .

En las regiones en que  $\eta$  disminuye al aumentar el gradiente de velocidad  $\dot{\gamma}$ , el comportamiento se denomina pseudoplástico; el dilatante en la que  $\eta$  aumenta con dicho gradiente. Si  $\eta$  resulta independiente del gradiente de velocidad, el fluido se comporta

Fig. 6.- Resumen de modelos no-newtonianos en estado estacionario (con fines comparativos se indica también el modelo newtoniano), (10).

como newtoniano, y entonces  $\eta = \mu$ .

Se han propuesto numerosas ecuaciones empíricas o modelos para expresar la relación que existe, en estado estacionario, entre  $\tau_{yx}$  y  $\dot{\gamma}$  (10). Todas las ecuaciones tienen parámetros empíricos, cuyo valor numérico puede determinarse correlacionando los datos experimentales de  $\tau_{yx}$  frente a  $\dot{\gamma}$  a temperatura y presión constante, ver apéndice C.

Por otro lado, la Ley de Hooke establece que la deformación de un cuerpo es proporcional al esfuerzo aplicado, donde la constante de proporcionalidad es el módulo de elasticidad de young.

$$\sigma = E \epsilon \tag{4}$$

La deformación  $\epsilon$  está definida como  $\frac{dL}{L}$ .

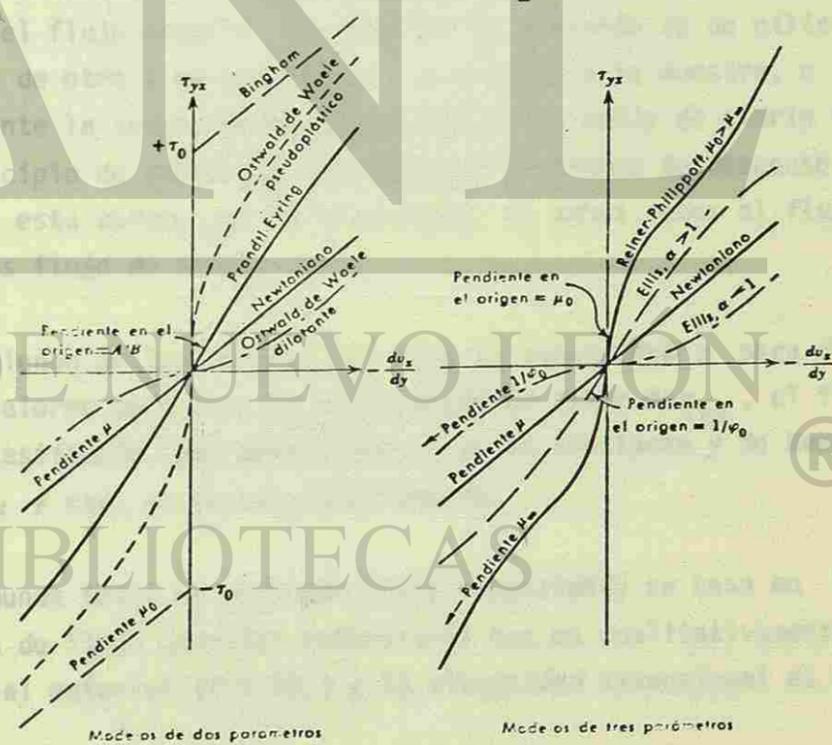


Fig. 6.- Resumen de modelos no-newtonianos en estado estacionario (con fines comparativos se indica también el modelo newtoniano), (10).

En general existen dos formas diferentes para efectuar la medición de la viscosidad del vidrio, una para valores bajos de viscosidad ( $10^{7-8}$  poise) y otra para valores altos ( $10^{7-8}$  poise). Estas dos formas de medición son cualitativamente distintas en cuanto al tipo de flujo empleado para efectuar la medición de la viscosidad a partir de la relación entre esfuerzo y deformación.

La primera forma de medición (baja viscosidad) se basa en la generación de flujo simple de corte (fig.7a), donde la viscosidad de corte está dada por

$$\mu = \frac{\tau_{yx}}{\dot{\gamma}} \quad (5)$$

donde  $\tau_{yx}$  representa el esfuerzo de corte y  $\dot{\gamma}$  el gradiente de velocidad.

Experimentalmente el flujo simple de corte se puede conseguir mediante; el flujo couette, que implica la rotación de un cilindro dentro de otro y en cuyo anulo se encuentra la muestra, o bien mediante la inmersión de una esfera en un medio de vidrio fundido (principio de stokes) y relacionando el tiempo de descenso ó ascenso de esta esfera con la viscosidad. En ambos casos el flujo generado es flujo de corte.

Dependiendo de los valores que tome la viscosidad  $\mu$  para diferentes valores de  $\dot{\gamma}$  que le corresponde un valor de  $\tau_{yx}$ , el flujo será clasificado como Newtoniano si  $\mu$  es constante y No Newtoniano si  $\mu \neq \text{cte}$ , en estado estacionario.

La segunda forma de medición (alta viscosidad) se basa en la generación de flujo uniaxial extensional que es cualitativamente diferente al anterior (fig.7B) y la viscosidad extensional es re-

presentada por

$$\eta = \frac{F/A}{\dot{\epsilon}} \quad (6)$$

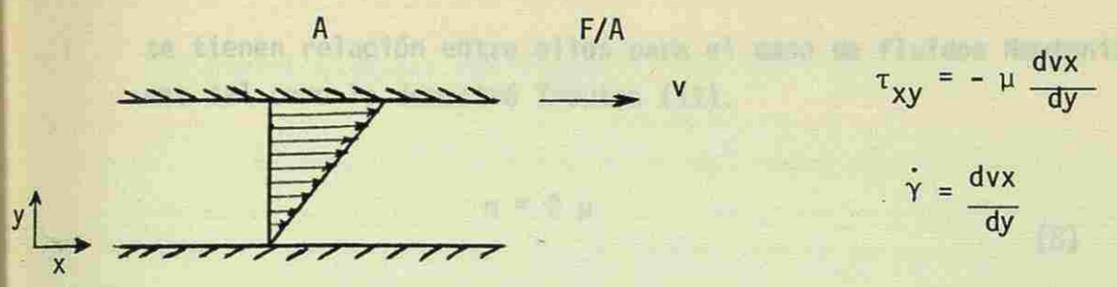
donde F representa la fuerza necesaria para estirar un cilindro de área de sección transversal A, a una velocidad V y  $\dot{\epsilon}$  representa el gradiente de velocidad extensional, definido como

$$\dot{\epsilon} = \frac{d}{dt} \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \frac{d}{dt} \ln \frac{L}{L_0} \quad (7)$$

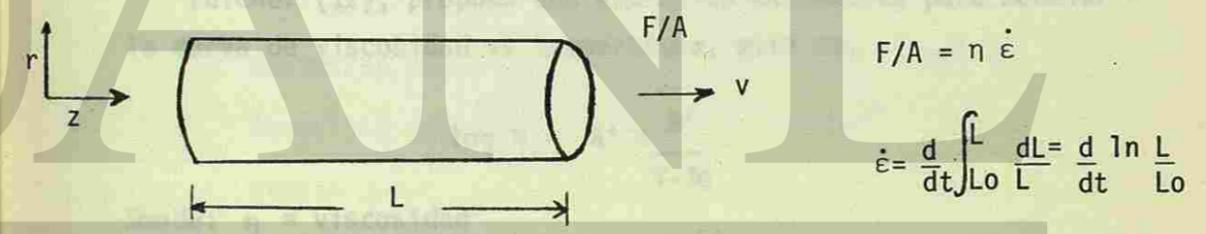
La viscosidad extensional de un material es la propiedad del material que indica la resistencia del mismo a fluir en flujo extensional, de la misma forma que la viscosidad (comúnmente conocida) es la resistencia del material a fluir en flujo simple de corte.

Esta segunda forma de medición que es la que nos compete, se originó como una respuesta a los problemas encontrados al intentar aplicar los métodos de medición anteriormente descritos para la determinación de la viscosidad del vidrio a relativas bajas temperaturas (alta viscosidad). Así pues, el método de la esfera descendente requería enormes tiempos de descenso o bien no se garantizaba una travesía rectilínea, similarmente el método de cilindros concéntricos generaba problemas de resistencia al desgaste de los mismos.

El flujo extensional difiere del flujo simple de corte desde su cinemática hasta las propiedades materiales involucradas y solo

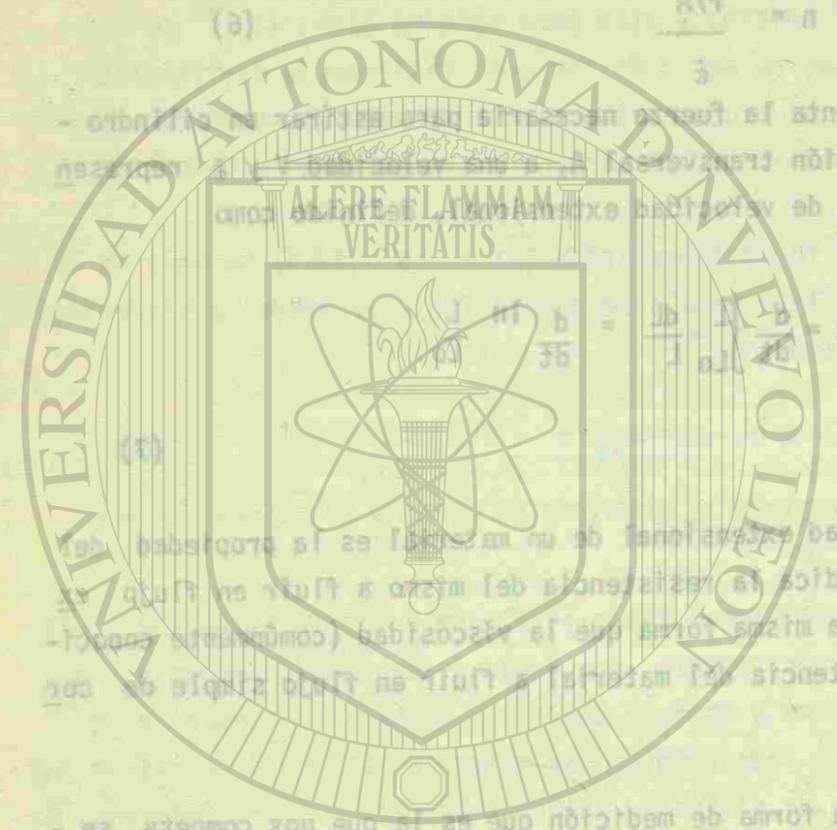


(a)



(b)

Fig 7.- a) Flujo simple de corte, b) Flujo extensional uniaxial.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



se tienen relación entre ellos para el caso de fluidos Newtonianos tal como lo demostró Trouton (11).

El comportamiento reológico del vidrio es importante para el estudio del estado  $\eta = 3 \mu$  sin embargo en la práctica lo que se hace es determinar los "puntos estándar" de la fabricación de vidrio (8)

Esta relación nos posibilita comparar los resultados obtenidos por las dos formas de medición anteriormente descritas, en estudios de viscosidad de los materiales.

La Fig. 8a, muestra una curva típica de viscosidad vs temperatura para el vidrio, en la cual podemos observar que la viscosidad cambia uniformemente con la temperatura, no ocurriendo esto con los materiales cristalinos, en los cuales la viscosidad cambia abruptamente en la temperatura de fusión.

Fulcher (12), propuso una expresión matemática para modelar la curva de viscosidad vs temperatura, esta es.

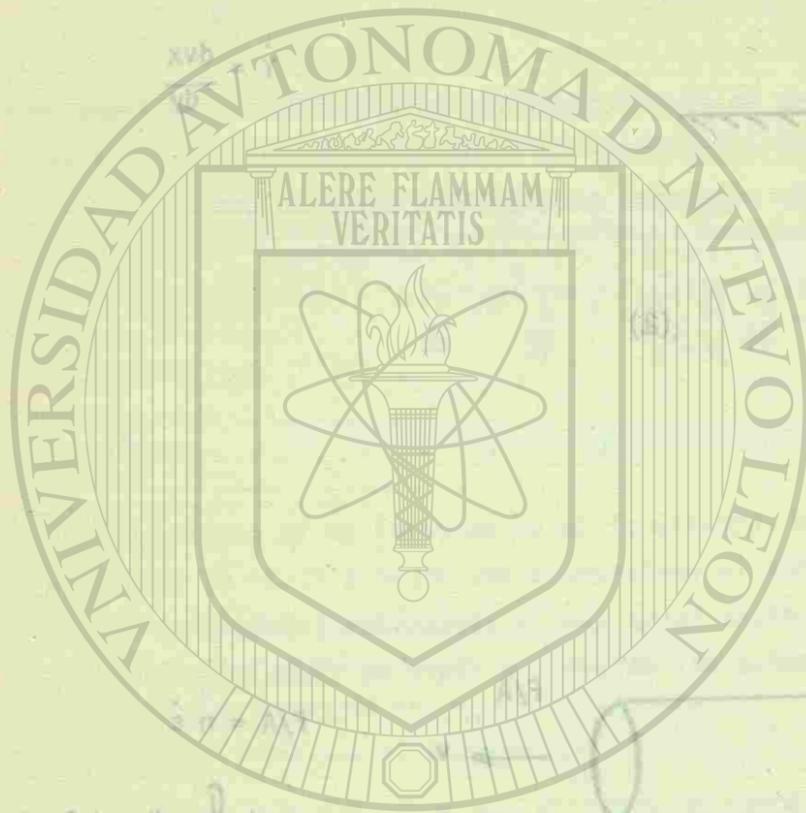
$$\log \eta = A' + \frac{B'}{T - T_0}$$

Donde:  $\eta$  = viscosidad

$A', B'$  = constantes

$T_0$  = temperatura de referencia

$T$  = temperatura



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

b) Puntos estándar del vidrio

El comportamiento reológico del vidrio es importante para el estudio del estado vireo, sin embargo en la práctica lo que se hace es determinar los "puntos estándar" de la fabricación de vidrio, tabla 12, estos puntos usualmente se utilizan para determinar la composición química del vidrio favorable a las operaciones de fusión y fabricación. Fig. 8

Tabla 12. Puntos estándar de viscosidad (12)

Punto estándar	Viscosidad, poise
Melting point	$10^2$
Working point	$10^4$
Flow point	$10^5$
Softening point	$10^{7.5-10^8}$
Annealing point	$10^{13}$
Strain point	$10^{14.5}$

Es claro que el concepto de "puntos estándar" es de gran utilidad para indicarnos la manejabilidad del vidrio, pero de ninguna manera (rigurosamente hablando) nos representa una propiedad material del mismo.

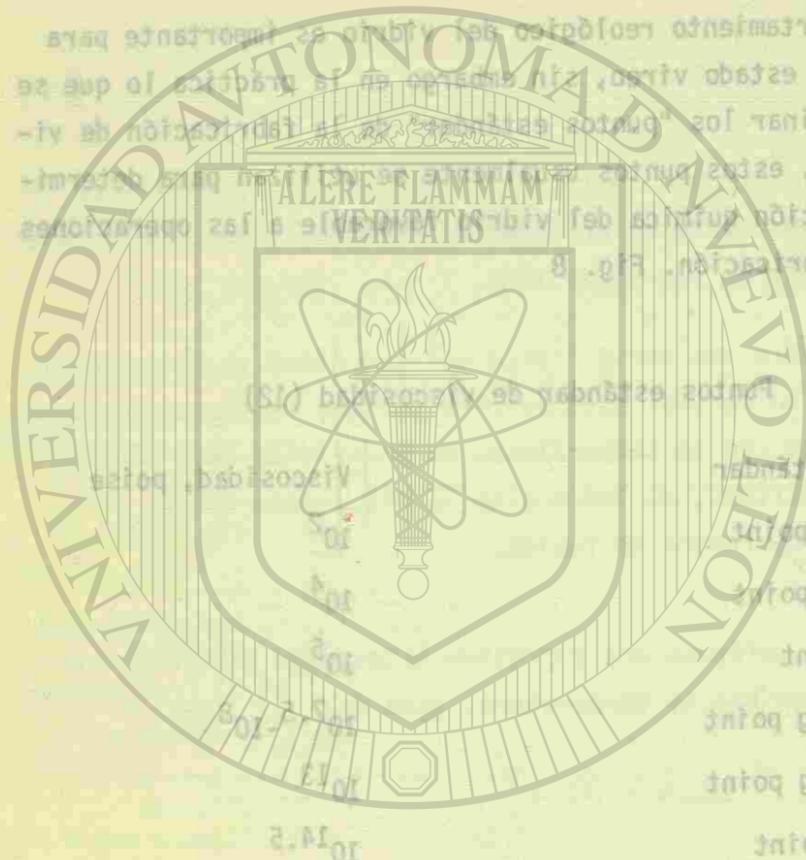
Fig. 8 a) Curva de viscosidad vs temperatura para un tipo de vidrio. b) Curvas de viscosidad vs temperatura para otros tipos de vidrio.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

d) Puntos estándar del vidrio

El comportamiento reológico del vidrio es importante para el estudio del estado vítreo, sin embargo, en la práctica lo que se hace es determinar los puntos estándar de referencia. En la Tabla 12, estos puntos estándar de referencia se relacionan con la composición química del vidrio y las operaciones de fusión y fabricación. Fig. 8



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS

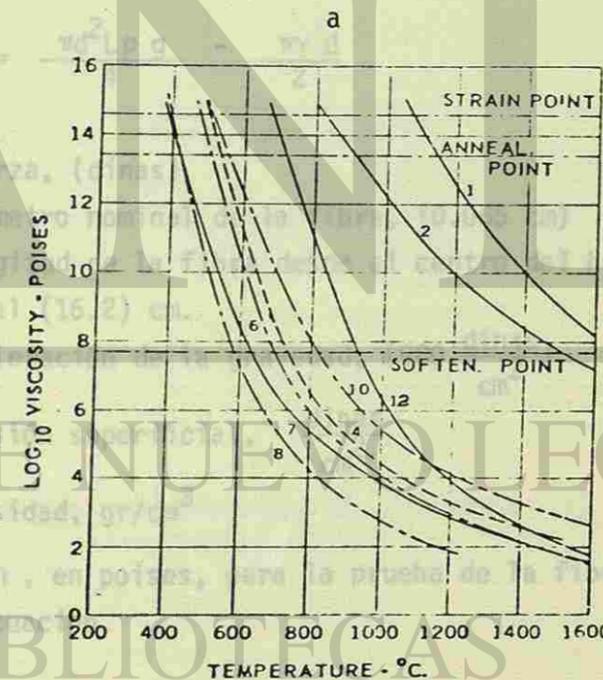
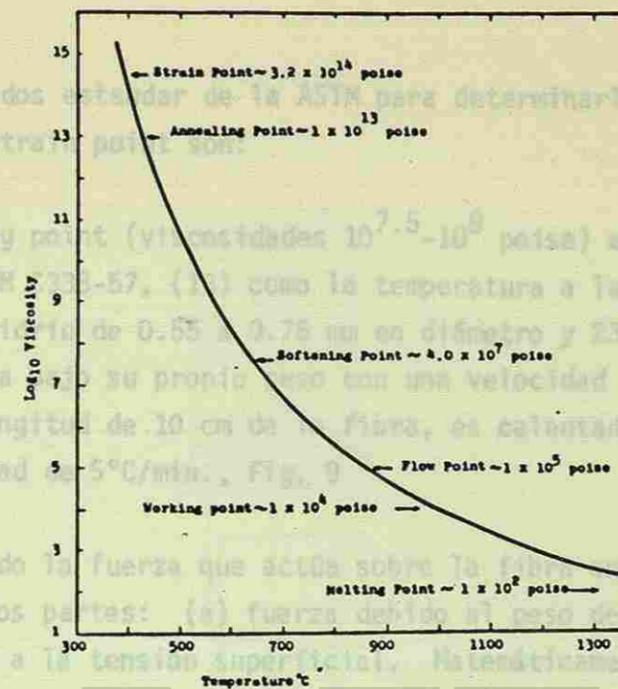


Fig. 8 a) Curva típica de viscosidad Vs temperatura para el vidrio, mostrando los puntos de referencia,  
b) Curvas de viscosidad para vidrios comerciales, los números indica composición de tabla 9, (9)



Fig. 8 a) Curvas típicas de viscosidad vs temperatura para el vidrio, mostrando los puntos de referencia.  
 b) Curvas de viscosidad para vidrios comerciales, los números indican composición de tabla 9. (9)

Los métodos estándar de la ASTM para determinarlos el softening, Annealing y strain point son:

Softening point (viscosidades  $10^{7.5}-10^8$  poise) es definido por la prueba ASTM C338-57, (13) como la temperatura a la cual una fibra uniforme de vidrio de 0.55 a 0.75 mm en diámetro y 23.5 cm de longitud, se elonga bajo su propio peso con una velocidad de 1 mm/min - cuando una longitud de 10 cm de la fibra, es calentado en un horno a una velocidad de  $5^\circ\text{C}/\text{min.}$ , Fig. 9

Examinando la fuerza que actúa sobre la fibra encontramos que consiste de dos partes: (a) fuerza debido al peso de la fibra (b) fuerza debido a la tensión superficial. Matemáticamente puede ser expresado como:

$$F_t = \frac{\pi d^2 L \rho g}{4} - \frac{\pi \gamma d}{2} \quad (9)$$

Donde  $F_t$  = fuerza, (dinas)

$d$  = diámetro nominal de la fibra, (0.065 cm)

$L$  = Longitud de la fibra desde el centro del horno hasta el final (16.2) cm.

$g$  = aceleración de la gravedad,  $(980 \frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2})$

$\gamma$  = tensión superficial,  $\frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2}$

Fig. 9  $\rho$  = densidad,  $\text{gr}/\text{cm}^3$  terminación del softening point (12)

la viscosidad  $\eta$ , en poises, para la prueba de la fibra es dada por la siguiente ecuación.

$$\eta = \frac{4F_t}{3\pi d^2} \frac{1}{e} \quad (10)$$

Los métodos estándar de la ASTM para determinar el softening point (12) son:

Softening point (viscosidades) es definido por la prueba ASTM D38-57, (13) la cual requiere que la muestra de vidrio de 10 cm de longitud se elonga bajo su propio peso a una velocidad de 2.18 cm/min. (Fig. 9)

Examinando la fuerza que actúa sobre la muestra se puede determinar la fuerza debida a la tensión superficial. Matemáticamente puede ser expresado como:

$$F_s = \frac{4\pi r^2 \gamma}{d}$$

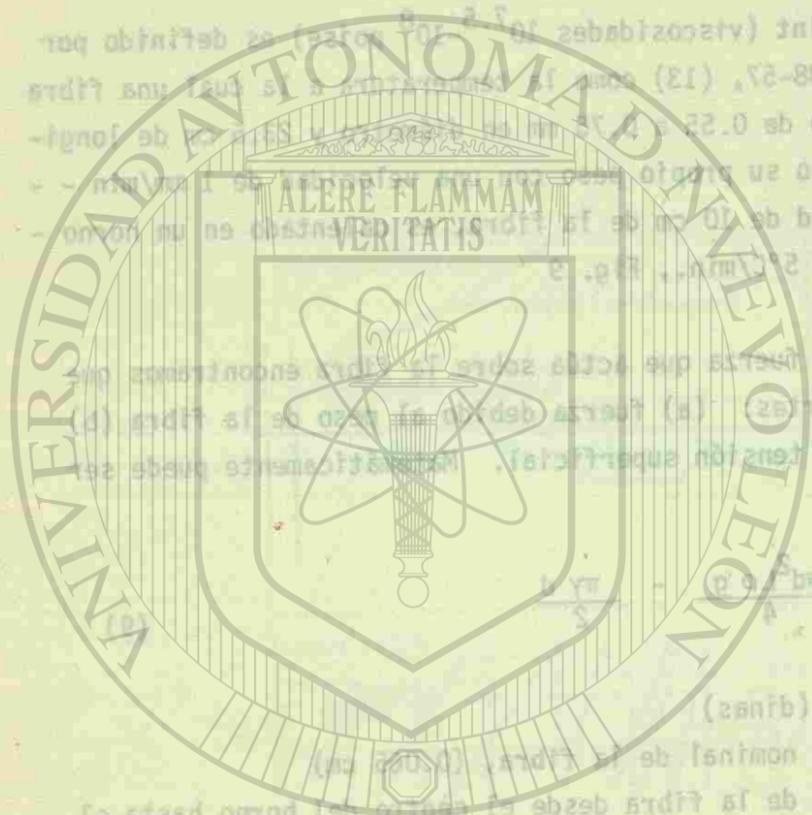
Donde  $F_s$  = fuerza ( dinas )  
 $d$  = diámetro nominal de la fibra ( 0.001 cm )  
 $r$  = longitud de la fibra desde el punto del horno hasta el final ( 10.2 cm )

$g$  = aceleración de la gravedad ( 980  $\frac{dinas}{cm}$  )  
 $\gamma$  = tensión superficial ( dinas/cm )  
 $\rho$  = densidad (  $\frac{g}{cm^3}$  )

La viscosidad  $\eta$ , en poises, para la prueba de la fibra es dada por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{4\pi r^2 L}{3\pi d^2 v}$$

(10)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Donde:  $l$  = longitud efectiva de la fibra, ( 6.9 cm )  
 $v$  = velocidad de elongación definida, ( 0.00167 cm/seg ó 1mm/min )

La longitud efectiva se determina como sigue (13)

$$l = \frac{d_2^2 (L_2 - l_2)}{d_1^2 - d_2^2}$$

Donde:  $l$  = longitud efectiva de la fibra  
 $L_1$  = longitud total de la fibra  
 $d_1$  = diámetro inicial de la fibra  
 $L_2$  = longitud total después de la elongación  
 $d_2$  = diámetro después de la elongación

Estas ecuaciones (9) y (10), sustituyendo valores y resolviendo para viscosidad se obtiene la siguiente expresión:

$$\eta = 2.18 \times 10^7 \left( \frac{\rho}{\gamma} \right) \left( \frac{L_1 - l_1}{L_2 - l_2} \right) \quad (11)$$

Esta ecuación correspondiente al que corresponde a la viscosidad está en la tabla 13.

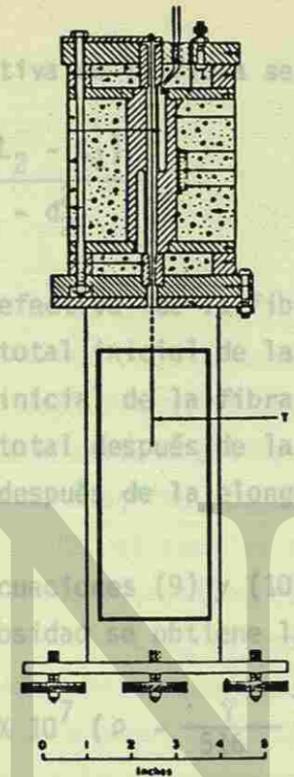
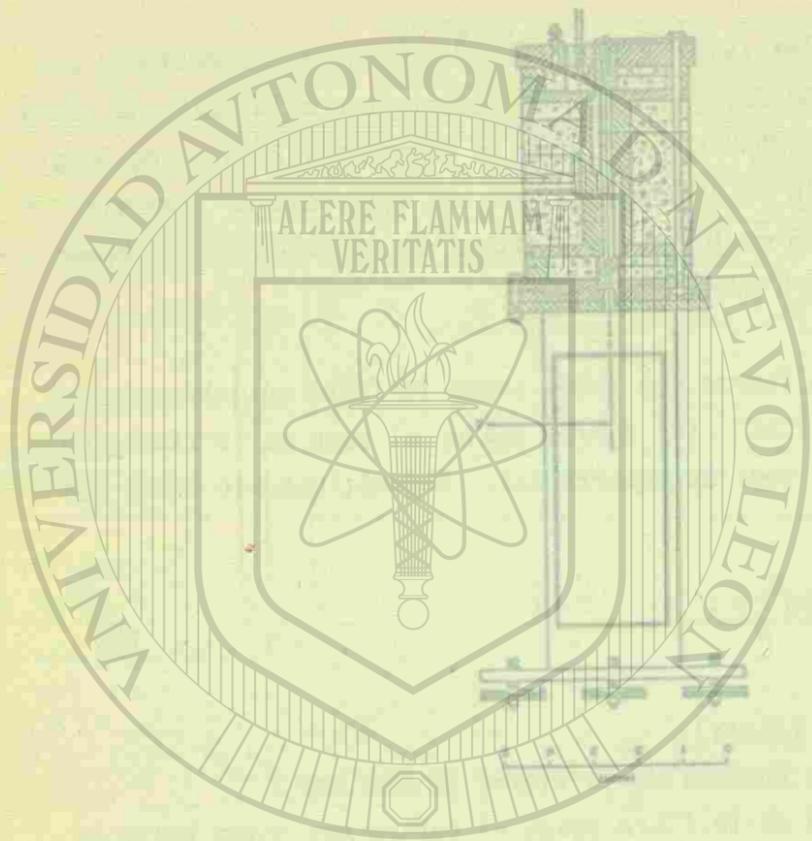


Fig. 9 Aparato para la determinación del softening point (12)





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Fig. 9. Aparato para la determinación del softening point (12)

Tabla 13. Influencia de la densidad y tensión superficial en la viscosidad correspondiente al softening point (12)

Donde:  $l$  = longitud efectiva de la fibra, (6.9 cm)  
 $e$  = velocidad de elongación definida, (0.00167 cm/seg ó 1mm/min)

La longitud efectiva de la fibra se determina como sigue (13).

vidrio	$\rho$	$\gamma$	$\eta$	$\log_{10} \eta$
silice	2.2	400	$3.1 \times 10^7$	7.49
soda-line	2.5	400	$4.2 \times 10^7$	7.62
alto plomo	6.0	400	$1.3 \times 10^8$	8.11

Donde:  $l_{ea}$  = longitud efectiva de la fibra  
 $L_1$  = longitud total inicial de la fibra  
 $d_1$  = diámetro inicial de la fibra  
 $L_2$  = longitud total después de la elongación  
 $d_2$  = diámetro después de la elongación

Combinando las ecuaciones (9) y (10), sustituyendo valores y resolviendo para viscosidad se obtiene la siguiente expresión.

$$\eta = 2.18 \times 10^7 \left( \rho - \frac{\gamma}{516} \right) \quad (11)$$

Esta ecuación muestra que la viscosidad correspondiente al "softening point" depende de la densidad y la tensión superficial del vidrio de prueba. Ejemplos de esta dependencia pueden verse en la tabla 13.

Donde:  $l$  = longitud efectiva de la fibra  
 $d$  = diámetro de la fibra



El softening point, viscosidad  $10^{15}$  poise, representa la temperatura a la cual esfuerzos internos son reducidos a valores bajos en 4 hrs. Se determina por extrapolación de la línea generada en la determinación de annealing point, Fig. 10, donde la velocidad de elongación establecida para el annealing point es multiplicada por

Tabla 13 Influencia de la densidad y tensión superficial en la viscosidad correspondiente al softening point (12).

vidrio	$\rho$	$\gamma$	$\eta$	$\log_{10} \eta$
silice	2.2	400	$3.1 \times 10^7$	7.49
soda-lime	2.5	300	$4.2 \times 10^7$	7.62
alto plomo	6.2	200	$1.3 \times 10^8$	8.11

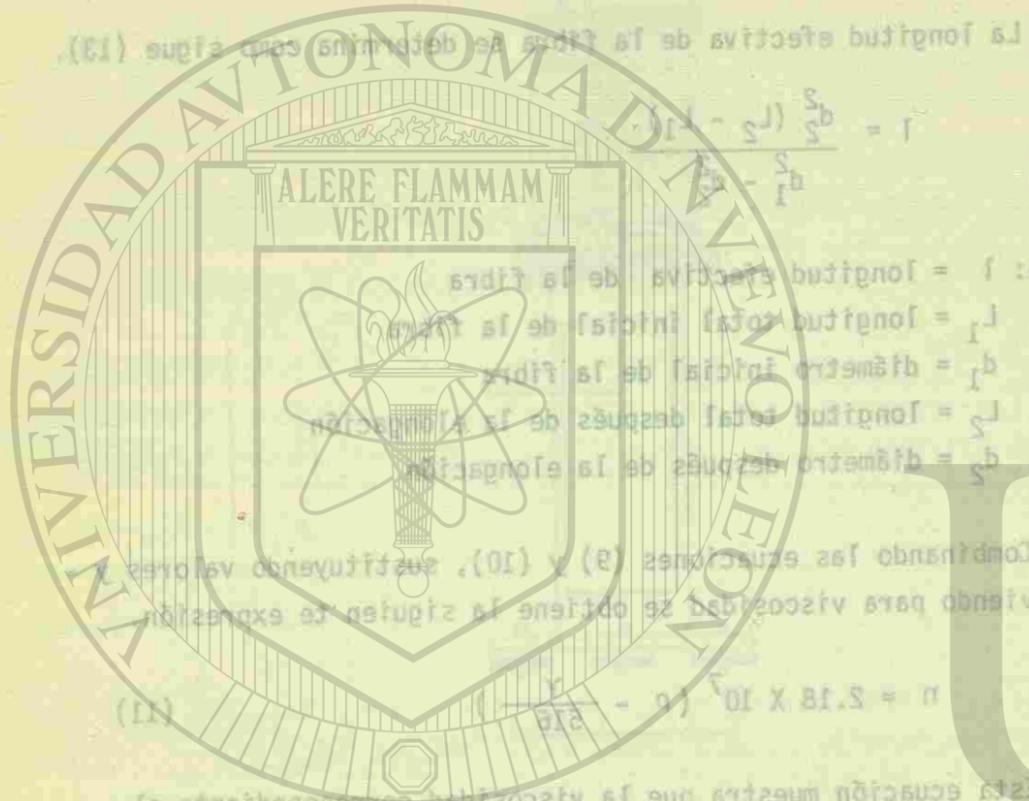
Annealing Point (viscosidad  $10^{13}$  poise) representa la temperatura en la cual las deformaciones internas del vidrio son reducidas a un límite comercial aceptable en 15 min. El procedimiento de la ASTM C336-69 indica que una fibra uniforme de vidrio de 0.55 a 0.75 mm de diámetro y 20 in de longitud, sometida a una carga de 1 kg. es llevada a un horno, Fig. 10, el cual es calentado  $25^\circ\text{C}$  arriba de una temperatura estimada para el annealing point y después enfriado con una velocidad de  $4^\circ\text{C}/\text{min}$ . Durante el enfriamiento la velocidad de elongación es experimentalmente determinada como una función de la temperatura y graficadas en papel semi-log como se muestra en la fig. 11. El annealing point es la temperatura donde la velocidad de elongación es:

$$\frac{2.5 \times 10^{-6}}{d^2} l \quad (\text{implica una viscosidad de } 10^{13} \text{ poise}) \quad (12)$$

Donde:  $l$  = longitud efectiva de la fibra

$d$  = diámetro de la fibra

Strain Point (viscosidad  $10^{14.5}$  poise), representa la temperatura a la cual esfuerzos internos son reducidos a valores bajos en 4 hrs. Se determina por entrapolación de la línea generada en la de terminación de annealing point, fig. 10, donde la velocidad de elongación establecida para el annealing point es multiplicada por - -



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tabla 13. Influencia de la densidad y tensión superficial en la viscosidad correspondiente al softening point (12).

Viscosity	Softening point	Density
100	5.5	2.5
200	5.5	2.5
300	5.5	2.5

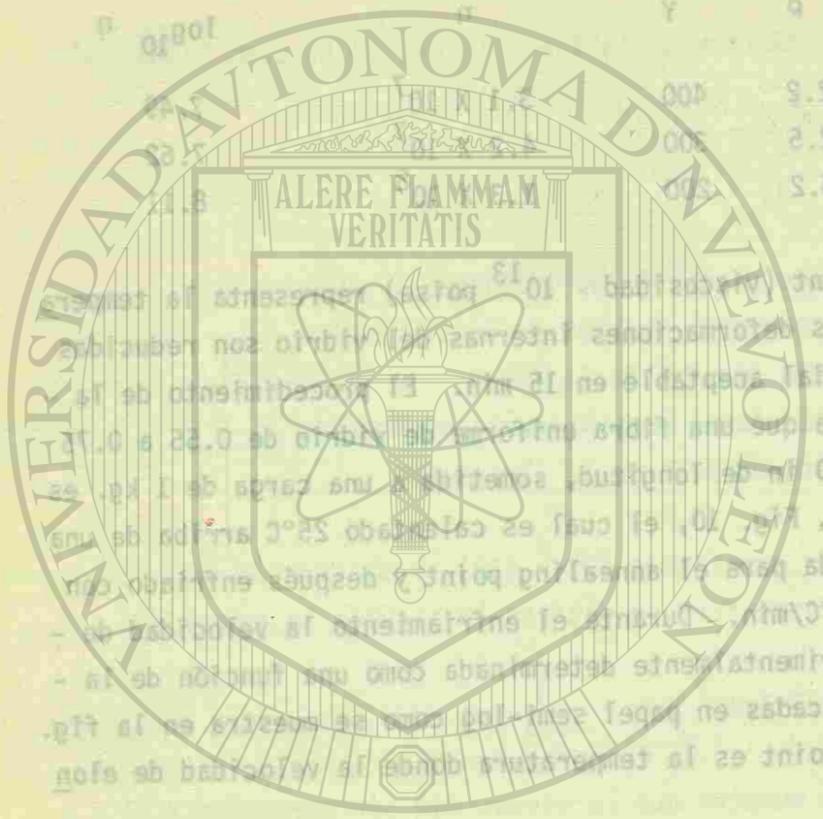
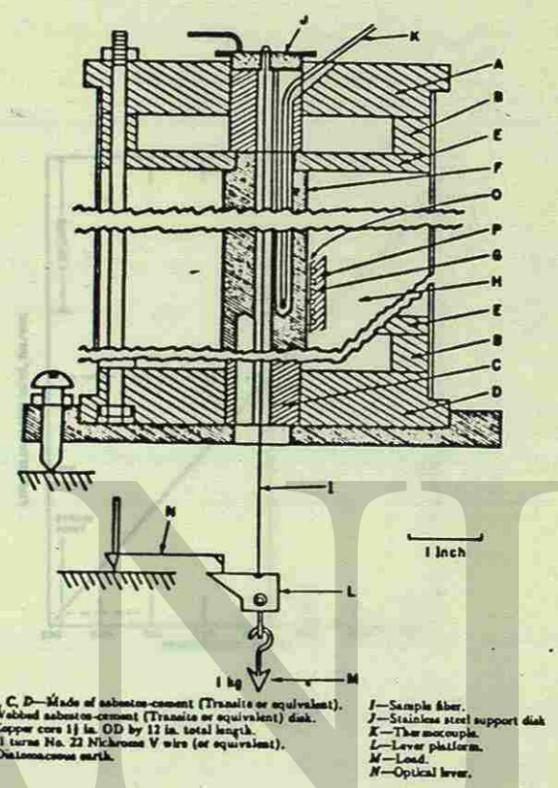


Fig. 11. El annealing point es la temperatura donde la velocidad de elongación es...

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

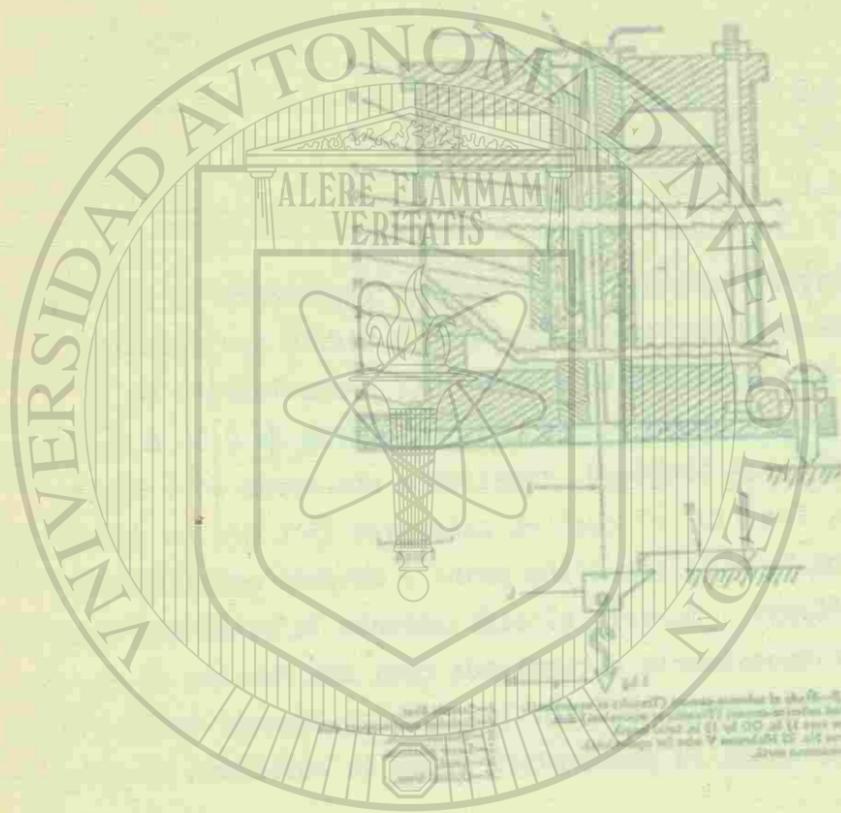
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



A, B, C, D—Made of asbestos-cement (Transite or equivalent).  
 E—Welded asbestos-cement (Transite or equivalent) disk.  
 F—Copper core 1/2 in. OD by 12 in. total length.  
 G—#1 turn No. 22 Nichrome V wire (or equivalent).  
 H—Diatomaceous earth.  
 I—Sample fiber.  
 J—Stainless steel support disk.  
 K—The micropip.  
 L—Lever platform.  
 M—Load.  
 N—Optical lever.

Fig. 11 Curva típica de velocidad de elongación...

Fig. 10 Aparato para la determinación de Annealing y Strain point (12).

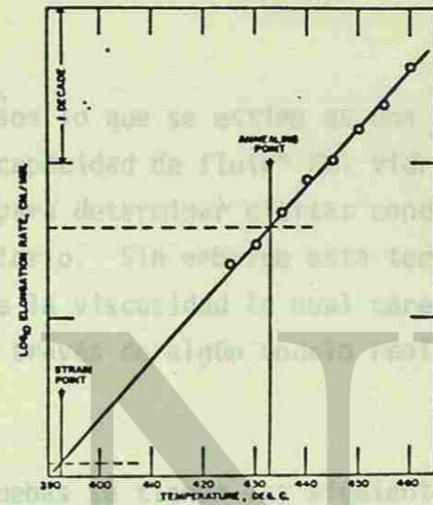


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

0.0316 y la temperatura que le corresponde determina el Strain Point.

La determinación de estos puntos en las muestras tiene algunos problemas, primero, la fibra experimenta un gradiente de temperatura, haciéndose necesario la determinación de una "longitud efectiva". Segundo, deben hacerse correcciones por expansión térmica del cuerpo y de la muestra.



En estos casos se debe elegir una temperatura que corresponde a cierta "velocidad de flujo" o "viscosidad" que tiene un significado práctico en las condiciones de operación en el proceso del vidrio. Sin embargo, esta temperatura es solo una medida indirecta de la viscosidad, la cual cambia cuando se quiere aplicar a las condiciones de movimiento.

En estas pruebas se debe tener en cuenta las aplicaciones (12):

- 1.- Al estirarse en cilindro de vidrio, por su propio peso o bien por la aplicación de una carga constante, el esfuerzo (F/A) no permanece constante dado que no existe compensación al cambio de área.

- 2.- En ambos casos el tensor de deformación es expresado en términos de elongación por unidad de longitud, un valor constante.

Fig. 11 Curva típica de velocidad de elongación Vs temperatura para la determinación de annealing y strain point (12).

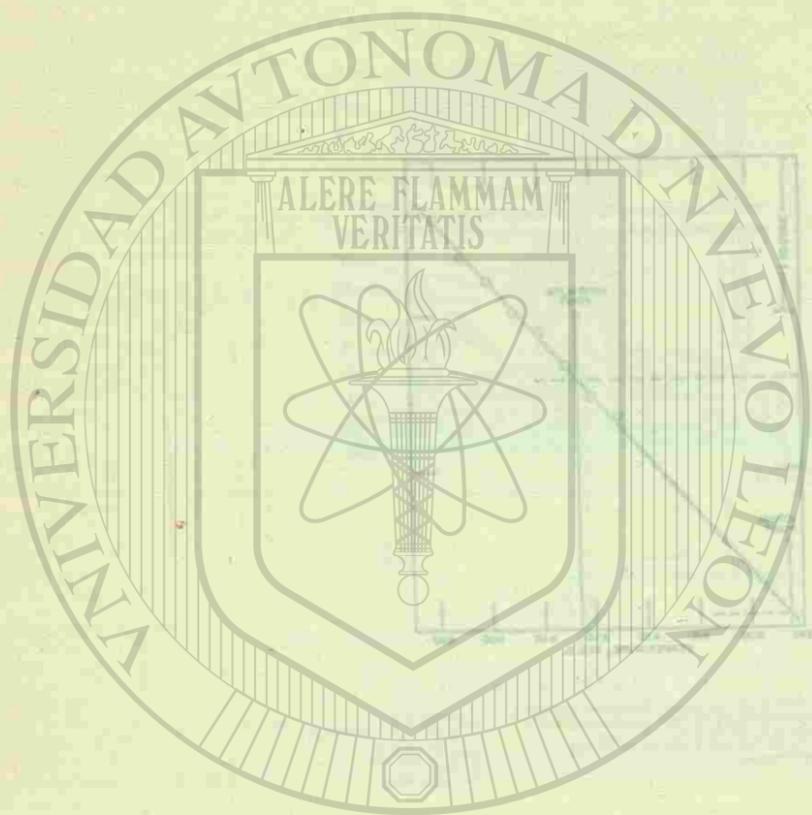
0.0316 y la temperatura que le corresponde determina el Strain Point.

La determinación de estos puntos estandars tiene algunos problemas, primero, la fibra experimenta un gradiente de temperatura, haciéndose necesario la determinación de una "longitud efectiva". Segundo, deben hacerse correcciones por expansión térmica del horno y de la muestra.

En estos casos lo que se estima es una temperatura que corresponde a cierta "capacidad de fluir" del vidrio, lo cual tiene significado práctico para determinar ciertas condiciones de operación en el proceso del vidrio. Sin embargo esta temperatura es solo una medida indirecta de la viscosidad la cual carece de sentido cuando se quiere aplicar a través de algún modelo reológico en las ecuaciones de movimiento.

En estas pruebas se tienen las siguientes implicaciones (14).

- 1.- Al estirarse un cilindro de vidrio, por su propio peso o bien por la aplicación de una carga constante, el esfuerzo ( $F/A$ ) no permanece constante dado que no existe compensación al cambio de área.
- 2.- En ambos casos el tensor de deformación es expresado como una velocidad de elongación y no como un gradiente de velocidad.
- 3.- No existe ninguna fundamentación para esperar un gradiente de velocidad constante, dado que el esfuerzo aplicado no es constante, lo que imposibilita el empleo de la ecuación (6) y por ende la relación de la ecuación (8).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

0.0316 y la temperatura que le corresponde determina el strain point.

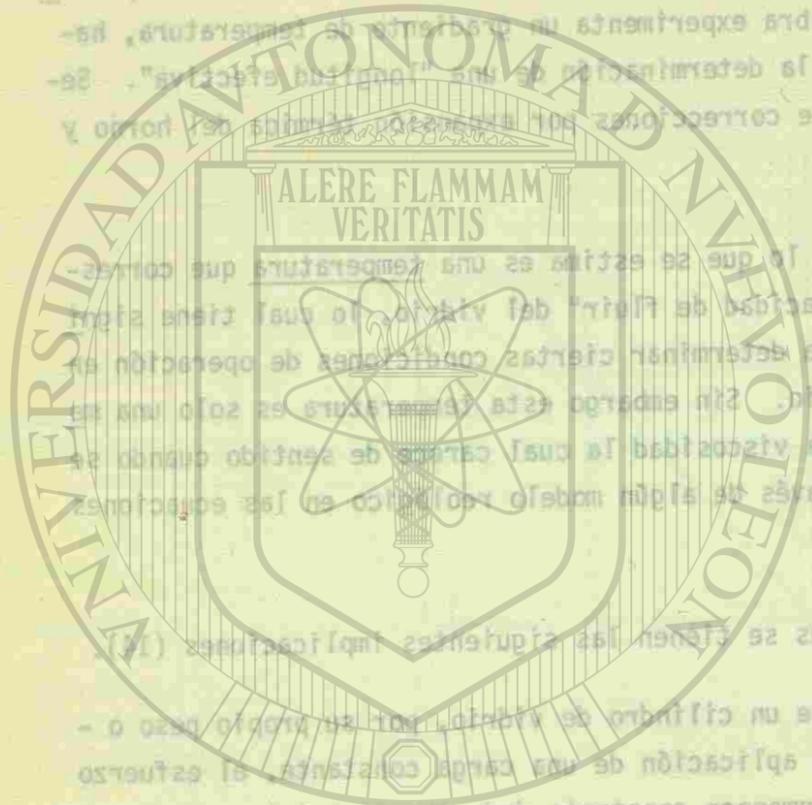
La determinación de estos puntos estándares tiene algunos problemas, primero, la fibra experimenta un gradiente de temperatura, así como un gradiente de velocidad. Siendo necesario la determinación de la temperatura y la velocidad en el punto de la muestra, deben hacerse correcciones por estos gradientes de temperatura y de velocidad.

En estos casos lo que se está haciendo es una temperatura que corresponde a cierta "capacidad de flujo" del vidrio, lo cual tiene un significado práctico para determinar ciertas condiciones de operación en el proceso del vidrio. Sin embargo esta temperatura es solo una medida indirecta de la viscosidad la cual cambia de sentido cuando se quiere aplicar a través de algún modelo matemático en las ecuaciones de movimiento.

En estas pruebas se tienen las siguientes implicaciones (17):  
1.- Al estirarse un cilindro de vidrio, el esfuerzo que se aplica bien por la aplicación de una carga constante, el esfuerzo (F/A) no permanece constante dado que no existe compensación al cambio de área.

2.- En ambos casos el tensor de deformación es expresado como una velocidad de elongación y no como un gradiente de velocidad.

3.- No existe ninguna fundamentación para esperar un gradiente de velocidad constante, dado que el esfuerzo aplicado no es constante, lo que impide el empleo de la ecuación (8) y por ende la relación de la ecuación (8).



ATERAL  
NEVO

de la ecuación (8) implícita en la ecuación (7) corresponde al factor 1/3 solo es válida para flujos laminares y si bien los gradientes de velocidad son bajos lo cual implica que en estas condiciones casi cualquier material es newtoniano, todavía estaría por demostrar se, en el vidrio para esfuerzos menores de  $1\text{kg/cm}^2$ .

Por lo anterior, no existe una fundamentación sólida para validar las mediciones de la viscosidad del vidrio en este rango de temperatura usando los métodos anteriormente descritos y así poder ser usadas en las ecuaciones de movimiento.

c) viscoelasticidad

Un fluido ideal definido por ecuación (5) establece una respuesta instantánea del esfuerzo al someter el material a un gradiente de velocidad, Por otra parte un sólido ideal se comporta de acuerdo con la Ley de Hooke. Ecuación (4).

Los materiales que tienen un comportamiento intermedio entre sólido ideal y líquido se denomina viscoelásticos.  
Elementos Básicos en la Modelación del Comportamiento Viscoelástico

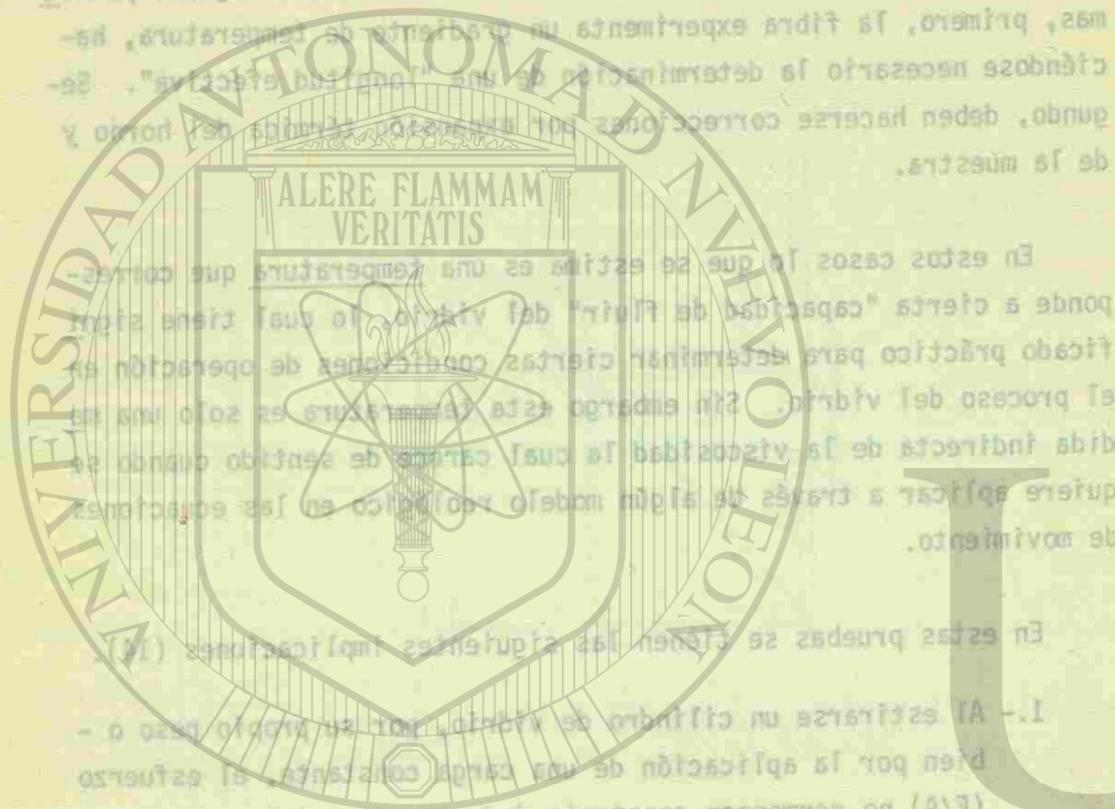
Antes de intentar un modelo para explicar el comportamiento viscoelástico de un material, debemos examinar la respuesta en deformación  $\epsilon$  de los sistemas ideales a un esfuerzo  $\sigma$ .

Un elemento elástico ideal está representado por un resorte que obedece a la Ley de Hooke. La deformación elástica es instantánea e independiente del tiempo. Fig. 12a. Una respuesta completamente viscosa es la de un fluido newtoniano, cuya deformación es li



0.0316 y la temperatura que le corresponde determina el strain point.

La determinación de estos puntos estándares tiene algunos problemas, primero, la fibra experimenta un gradiente de temperatura, así como un gradiente de velocidad. Siendo necesario la determinación de la temperatura y la velocidad en el punto de la muestra, deben hacerse correcciones por estos gradientes de temperatura y de velocidad.



En estos casos lo que se está es una temperatura que corresponde a cierta "capacidad de flujo" del vidrio, lo cual tiene un significado práctico para determinar ciertas condiciones de operación en el proceso del vidrio. Sin embargo esta temperatura es solo una medida indirecta de la viscosidad la cual cambia de sentido cuando se quiere aplicar a través de algún modelo matemático en las ecuaciones de movimiento.

En estas pruebas se tienen las siguientes implicaciones (17):  
1.- Al estirarse un cilindro de vidrio, por el propio peso o bien por la aplicación de una carga constante, el esfuerzo (F/A) no permanece constante dado que no existe compensación al cambio de área.

2.- En ambos casos el tensor de deformación es expresado como una velocidad de elongación y no como un gradiente de velocidad.

3.- No existe ninguna fundamentación para esperar un gradiente de velocidad constante, dado que el esfuerzo aplicado no es constante, lo que impide el empleo de la ecuación (8) y por ende la relación de la ecuación (8).

ATERAL  
WEVO

de la ecuación (8) implícita en la ecuación (10) corresponde al factor 1/3 solo es válida para flujos laminares y si bien los gradientes de velocidad son bajos lo cual implica que en estas condiciones casi cualquier material es newtoniano, todavía estaría por demostrarse, en el vidrio para esfuerzos menores de  $1\text{kg/cm}^2$ .

Por lo anterior, no existe una fundamentación sólida para validar las mediciones de la viscosidad del vidrio en este rango de temperatura usando los métodos anteriormente descritos y así poder ser usadas en las ecuaciones de movimiento.

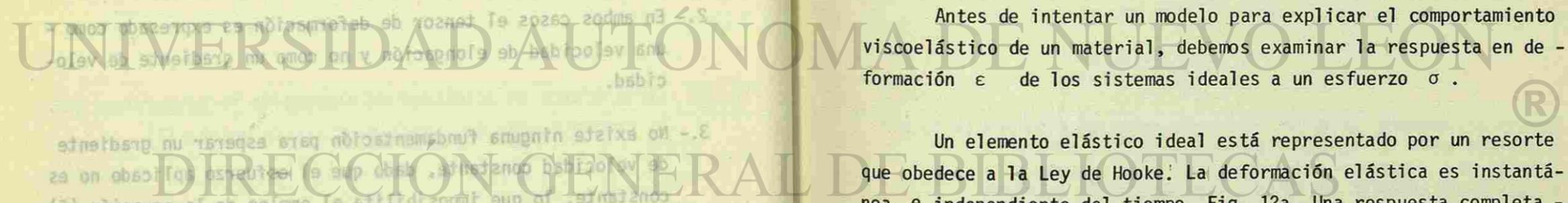
### c) viscoelasticidad

Un fluido ideal definido por ecuación (5) establece una respuesta instantánea del esfuerzo al someter el material a un gradiente de velocidad, Por otra parte un sólido ideal se comporta de acuerdo con la Ley de Hooke. Ecuación (4).

Los materiales que tienen un comportamiento intermedio entre sólido ideal y líquido se denomina viscoelásticos.  
Elementos Básicos en la Modelación del Comportamiento Viscoelástico

Antes de intentar un modelo para explicar el comportamiento viscoelástico de un material, debemos examinar la respuesta en deformación  $\epsilon$  de los sistemas ideales a un esfuerzo  $\sigma$ .

Un elemento elástico ideal está representado por un resorte que obedece a la Ley de Hooke. La deformación elástica es instantánea e independiente del tiempo. Fig. 12a. Una respuesta completamente viscosa es la de un fluido newtoniano, cuya deformación es li



4.- La relación de la ecuación (8) implícita en la ecuación (10) que corresponde al factor 1/3 solo es válida para flujos newtonianos y si bien los gradientes de velocidad son bajos lo cual implica que en estas condiciones casi cualquier material es newtoniano, todavía estaría por demostrarse, en el vidrio para esfuerzos menores de  $1\text{kg/cm}^2$ .

Por lo anterior, no existe una fundamentación sólida para validar las mediciones de la viscosidad del vidrio en este rango de temperatura usando los métodos anteriormente descritos y así poder ser usadas en las ecuaciones de movimiento.

c) viscoelasticidad

Un fluido ideal definido por ecuación (5) establece una respuesta instantánea del esfuerzo al someter el material a un gradiente de velocidad, Por otra parte un sólido ideal se comporta de acuerdo con la Ley de Hooke. Ecuación (4).

Los materiales que tienen un comportamiento intermedio entre sólido ideal y líquido se denomina viscoelásticos.

Elementos Básicos en la Modelación del Comportamiento Viscoelástico

Antes de intentar un modelo para explicar el comportamiento viscoelástico de un material, debemos examinar la respuesta en deformación  $\epsilon$  de los sistemas ideales a un esfuerzo  $\sigma$ .

Un elemento elástico ideal está representado por un resorte que obedece a la Ley de Hooke. La deformación elástica es instantánea e independiente del tiempo. Fig. 12a. Una respuesta completamente viscosa es la de un fluido newtoniano, cuya deformación es li

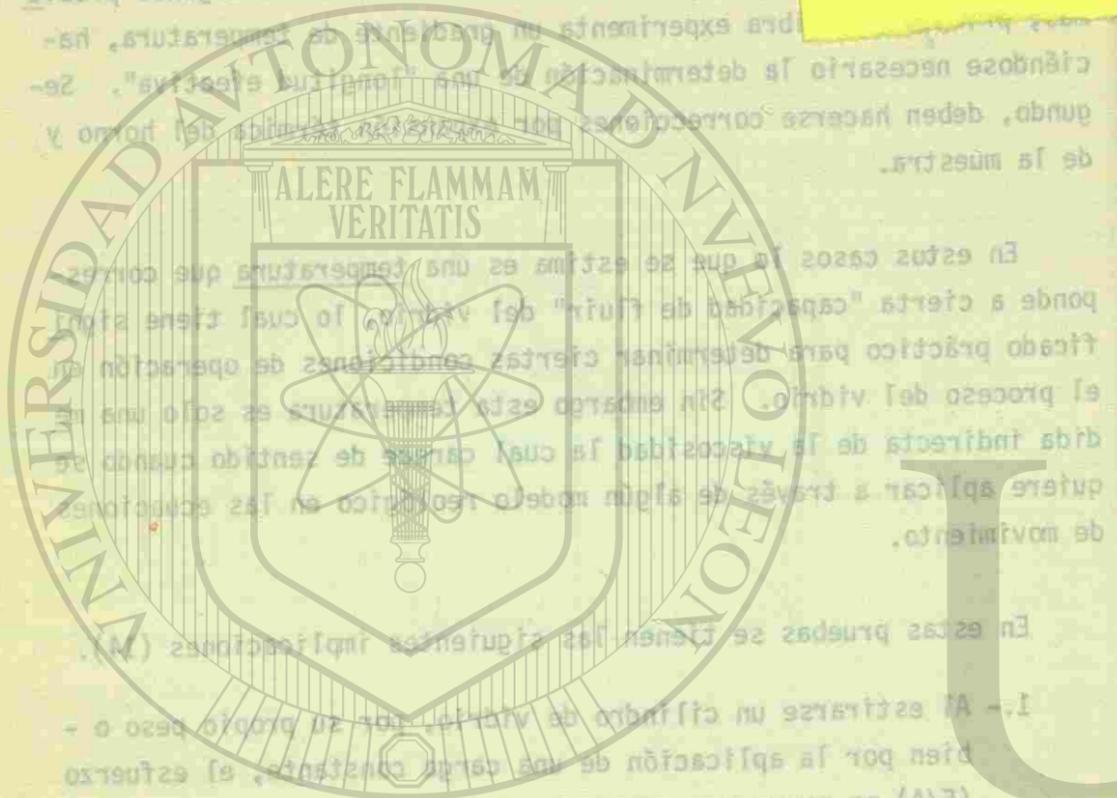
... que se corresponde determina el strain point.

En estos casos la que se estima es una temperatura que corresponde a cierta "capacidad de flujo" del vidrio, lo cual tiene un significado práctico para determinar ciertas condiciones de operación en el proceso del vidrio. Sin embargo esta temperatura es solo una medida indirecta de la viscosidad la cual cambia de sentido cuando se quiere aplicar a través de algún modelo teórico en las ecuaciones de movimiento.

En estas pruebas se tienen las siguientes implicaciones (M):  
1.- Al estirarse un cilindro de vidrio, el producto peso  $\times$  volumen bien por la aplicación de un esfuerzo constante, el esfuerzo (F/A) no permanece constante dado que no existe compensación al cambio de área.

2.- En ambos casos el tensor de deformación es expresado como una velocidad de elongación y no como un gradiente de velocidad.

3.- No existe ninguna fundamentación para esperar un gradiente de velocidad constante, dado que el esfuerzo aplicado no es constante, lo que impide el empleo de la ecuación (8) y por ende la relación de la ecuación (8).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS

neal con el tiempo mientras se aplica el esfuerzo y es completamente irre recuperable. La analogía mecánica simple de un fluido newtoniano es un amortiguador, Fig. 12b.

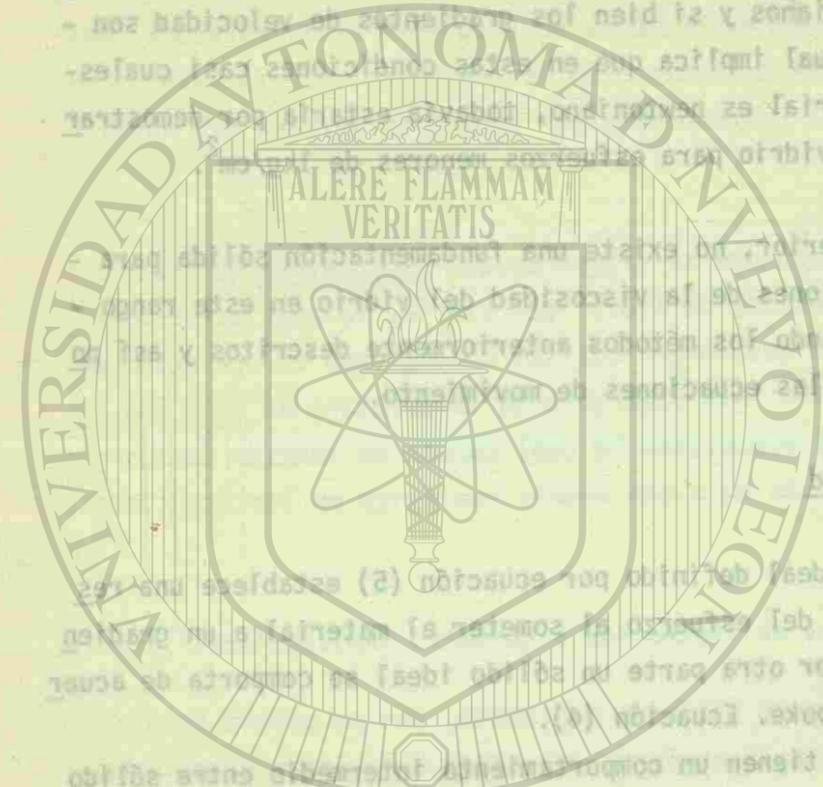
Las pruebas a que regularmente se someten estos materiales son dos, la primera llamada Creep, en la cual se somete al material a un esfuerzo constante  $\sigma = cte$  y el Creep Compliance ( $J(t)$ ) a algún tiempo  $t$  es la relación de la deformación a el esfuerzo constante. Cuando la curva Creep Compliance-tiempo para diferentes esfuerzos todas coinciden, el comportamiento es lineal viscoelástico, para muchos materiales el Creep Compliance a algún tiempo  $t$  dado, donde  $t > 0$  incrementa cuando el esfuerzo se incrementa, tales materiales muestran un comportamiento viscoelástico no lineal, y la interpretación de los datos experimentales es más difícil. Sin embargo, en muchos casos la desviación puede ser pequeña y el material puede ser considerado lineal viscoelástico para un rango de esfuerzos.

La segunda prueba se llama relajación de esfuerzos ( $\gamma(t)$ ) y en ella se mantiene constante la deformación y se registra como decrece el esfuerzo con el tiempo.

Fig.12 a) Analogía mecánica resorte y relación deformación-tiempo a tensión constante con eliminación de dicha tensión a un tiempo  $t_0$ , para un fluido viscoso ideal; b) Analogía mecánica amortiguador y relación deformación-tiempo a tensión constante con eliminación posterior de dicha tensión a un tiempo  $t_0$ , para un fluido viscoso ideal.

4.- La relación de la ecuación (8) implícita en la ecuación (10) que corresponde al factor  $\lambda$  solo es válida para fluidos newtonianos y si bien los fluidos de viscosidad son - bajos lo cual implica que en estos casos casi cuales- quier material es newtoniano, no se debe confundir con el hecho de que en el vidrio para algunos momentos de la vida se comporta como un fluido newtoniano. Por lo anterior, no existe una fundamentación sólida para validar las mediciones de la viscosidad del vidrio en este rango de temperatura usando los métodos anteriores. Es necesario ser usadas en las ecuaciones de movimiento.

Un fluido ideal definido por ecuación (2) establece que las puestas instantáneas del esfuerzo al someter el material a un gradiente de velocidad. Por otra parte el fluido ideal se comporta de acuerdo con la Ley de Hooke. Ecuación (4). Los materiales que tienen un comportamiento intermedio entre sólido ideal y fluido se denominan viscoelásticos. Elementos básicos en la Modelación del Comportamiento Viscoelástico



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

nal con el tiempo mientras se aplica el esfuerzo y es completa-  
te irreversitable. La analogía mecánica simple de un fluido newto-  
niano es un amortiguador, fig. 12b.

Las pruebas a que se refiere esta analogía son de dos tipos. En el primer tipo se aplica un esfuerzo constante a un tiempo  $t$  y se mide la deformación  $\epsilon$  a algún tiempo  $t$  es la relación de la deformación a el esfuerzo constante. Cuando la curva Creep Compliance cambia para diferentes esfuerzos todas con el mismo comportamiento es lineal viscosidad. Para muchos materiales el Creep Compliance a un tiempo  $t$  es dado, donde  $t$  es el tiempo cuando el esfuerzo es incrementado, tales materiales muestran un comportamiento viscosidad no lineal. La interpretación de los datos experimentales es más difícil. Sin embargo, en muchos casos la desviación puede ser pequeña y el material puede ser considerado lineal viscosidad para un rango de esfuerzos.

La segunda prueba se llama relación de esfuerzos  $\sigma(t)$  y en ella se mantiene constante la deformación y se registra como decrece el esfuerzo con el tiempo.

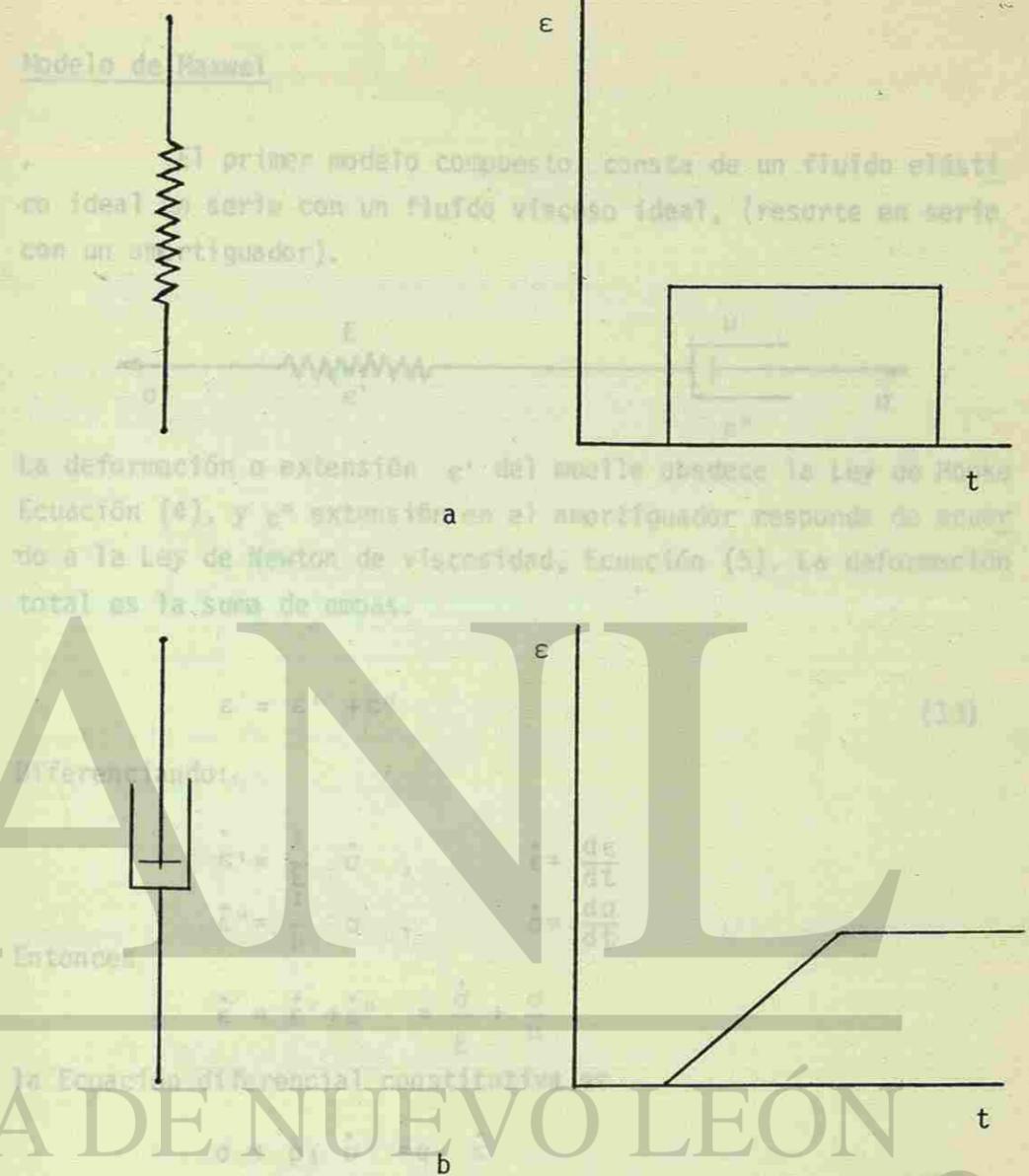
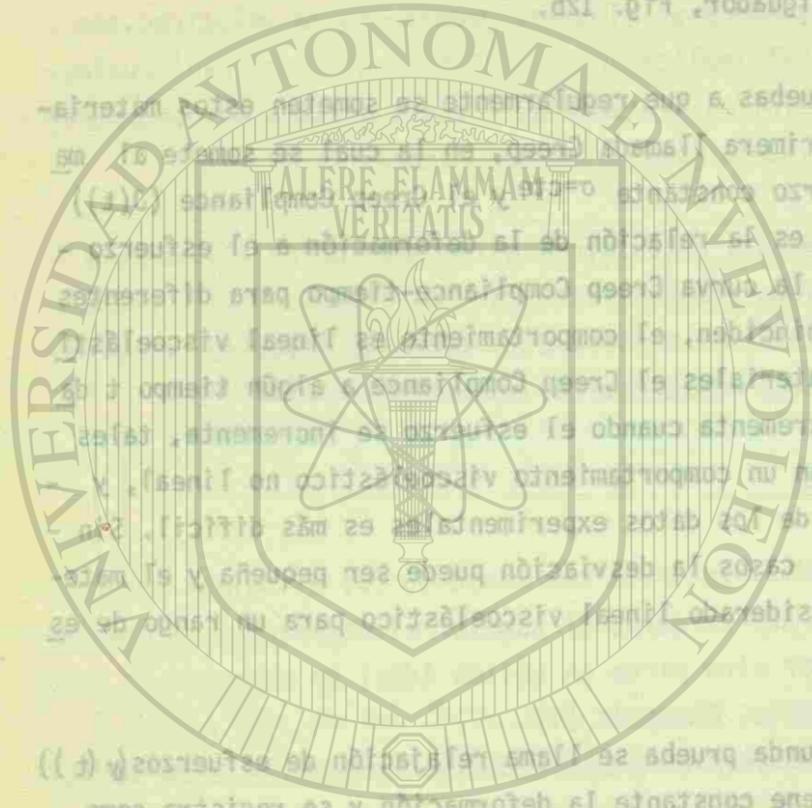


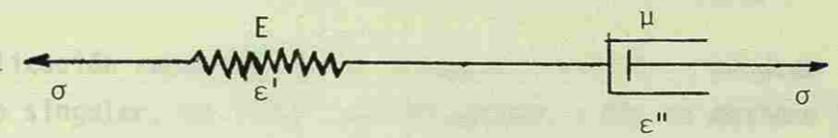
Fig.12 a) Analogía mecánica resorte y relación deformación-tiempo a tensión constante, con eliminación de dicha tensión a un tiempo  $t$ , para un fluido elástico ideal; b) Analogía - Mecánica (Amortiguador) y relación deformación-tiempo a tensión constante con eliminación posterior de dicha tensión a un tiempo  $t$ , para un fluido viscoso ideal.



Fig. 12 a) Analogía mecánica resorte y relación deformación-tiempo a tensión constante, b) relación tensión-deformación-tiempo a tensión constante con eliminación posterior de dicha tensión a un tiempo t, para un fluido viscoso ideal.

Modelo de Maxwell

El primer modelo compuesto, consta de un fluido elástico ideal en serie con un fluido viscoso ideal, (resorte en serie con un amortiguador).



La deformación o extensión  $\epsilon'$  del muelle obedece la Ley de Hooke Ecuación (4), y  $\epsilon''$  extensión en el amortiguador responde de acuerdo a la Ley de Newton de viscosidad, Ecuación (5). La deformación total es la suma de ambas.

$$\epsilon = \epsilon' + \epsilon'' \tag{13}$$

Diferenciando:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}' &= \frac{1}{E} \dot{\sigma} & \dot{\epsilon} &= \frac{d\epsilon}{dt} \\ \dot{\epsilon}'' &= \frac{1}{\mu} \sigma & \dot{\sigma} &= \frac{d\sigma}{dt} \end{aligned}$$

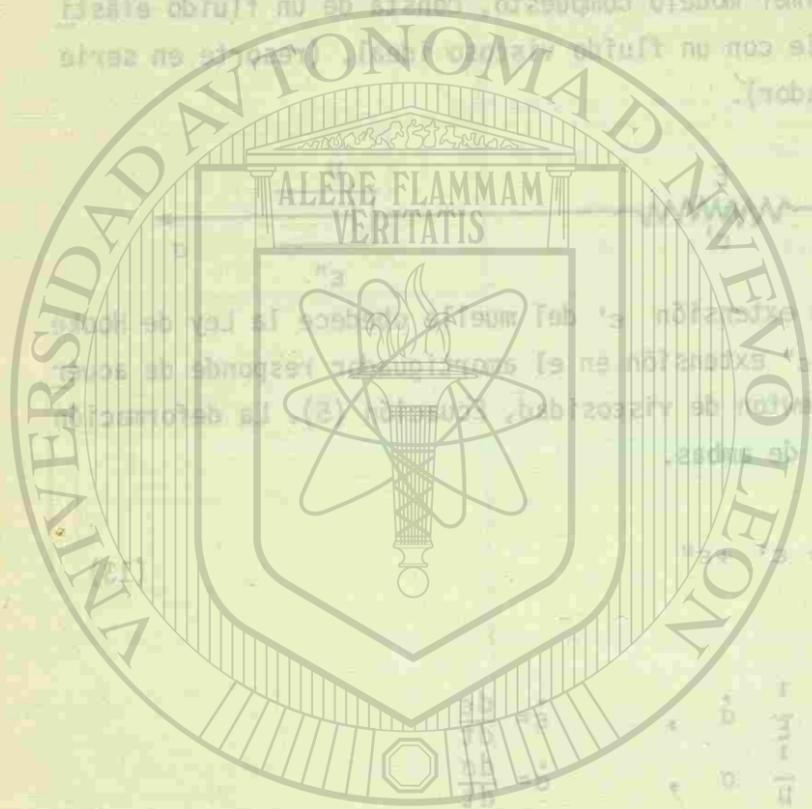
Entonces

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}' + \dot{\epsilon}'' = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\mu}$$

La Ecuación diferencial constitutiva es

$$\sigma + p_1 \dot{\sigma} = q_1 \dot{\epsilon} \tag{14}$$

$$p_1 = \frac{\mu}{E}, \quad q_1 = \mu$$



Modelo de Maxwell

El primer modelo compuesto consta de un fluido elástico ideal en serie con un fluido viscoso en serie con un amortiguador.

Primera prueba, fase creep, a t=0,  $\sigma = \sigma_0$  e integrando la Ecuación (14), se obtiene

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{q_1} t + C_1, t > 0 \tag{15}$$

Para determinar  $C_1$  se necesita una condición frontera.

La aplicación repentina de un esfuerzo  $\sigma_0$  a t=0 produce un efecto singular, en  $\dot{\sigma}(t)$ , si integramos a 14, se obtiene lo siguiente.

Integrando:

$$\int_{-\tau}^{+\tau} \sigma dt + p_1 [\sigma(+\tau) - \sigma(-\tau)] = q_1 [\epsilon(+\tau) - \epsilon(-\tau)] \tag{18}$$

$$p_1 \sigma_0 = q_1 \epsilon_0$$

Un análisis en la Ecuación (15), para  $t=0^+$ , nos indica que  $C_1 = \epsilon_0$  por lo que el valor de  $C_1$  es.

$$C_1 = \frac{\sigma_0 p_1}{q_1} \tag{16}$$

Entonces sustituyendo  $C_1$  en Ecuación (15), da lo siguiente.

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{q_1} (p_1 + t)$$

$$J(t) = \frac{p_1 + t}{q_1} = \epsilon + \frac{t}{\mu}$$

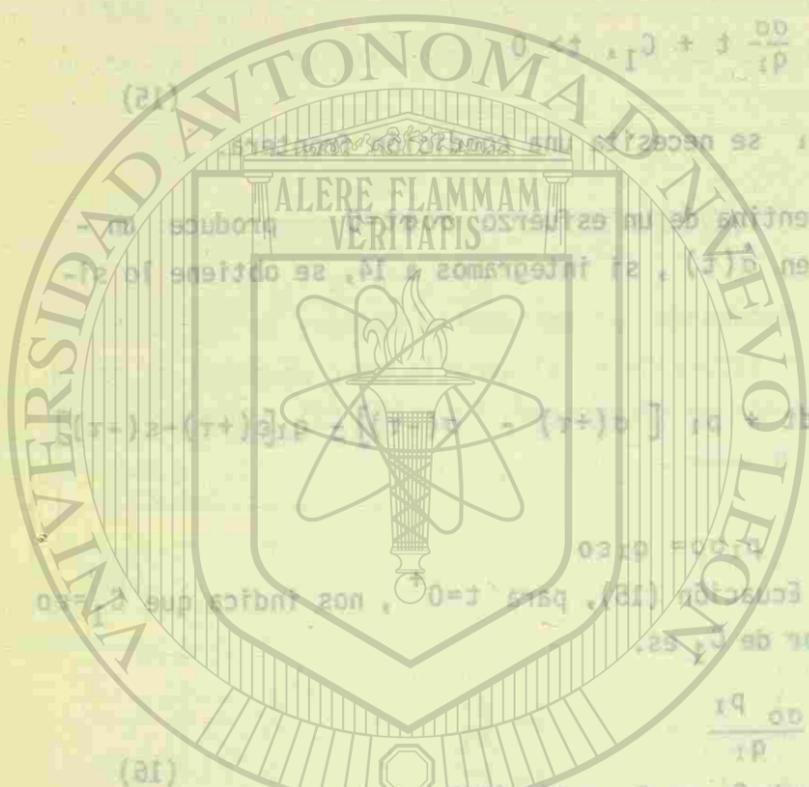
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



102113687

Primera prueba, fase creep,  $\dot{\epsilon} = 0$ ,  $\sigma = \sigma_0$ . e integrando la Ecuación (14), se obtiene

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E} + C_1 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (15)$$



Para determinar  $C_1$  se necesita un dato más. La aplicación repentina de un esfuerzo  $\sigma_0$  produce un efecto singular, en  $t=0$ , si hacemos  $\dot{\epsilon} = 0$ , se obtiene lo siguiente.

$$\left. \frac{d\epsilon}{dt} \right|_{t=0} = 0$$

Un análisis en la Ecuación (15), para  $t=0$ , nos indica que por lo que el valor de  $C_1$  es:

$$C_1 = \frac{\sigma_0}{E} \left( \frac{1}{1 + \frac{E}{\eta}} \right) \quad (16)$$

Entonces sustituyendo  $C_1$  en Ecuación (15), da lo siguiente:

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left( \frac{1}{1 + \frac{E}{\eta}} \right) \left( 1 + e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (17)$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



la prueba de relajación, indica que a  $unt=t_1$  la deformación se mantendrá constante y se verá como varía el esfuerzo con el tiempo.

$$\begin{aligned} \sigma + p_1 \dot{\sigma} &= q_1 \dot{\epsilon} \\ \dot{\epsilon} &= 0 \\ \sigma + p_1 \frac{d\sigma}{dt} &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

integrando:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{(t-t^1)}{p_1}} \quad (18)$$

la respuesta de ambas pruebas se muestra en la Fig. 13

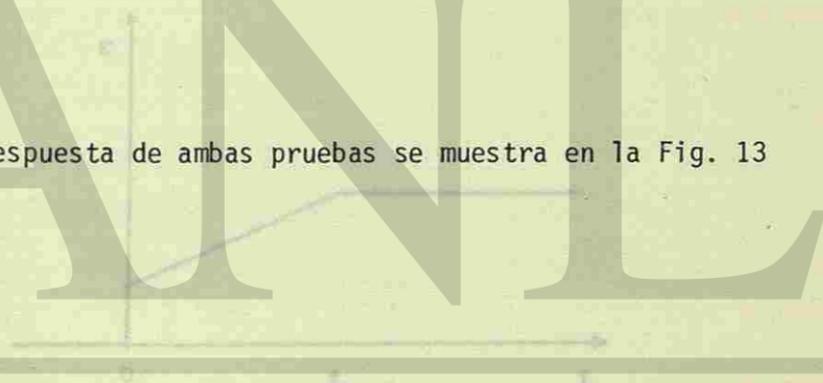
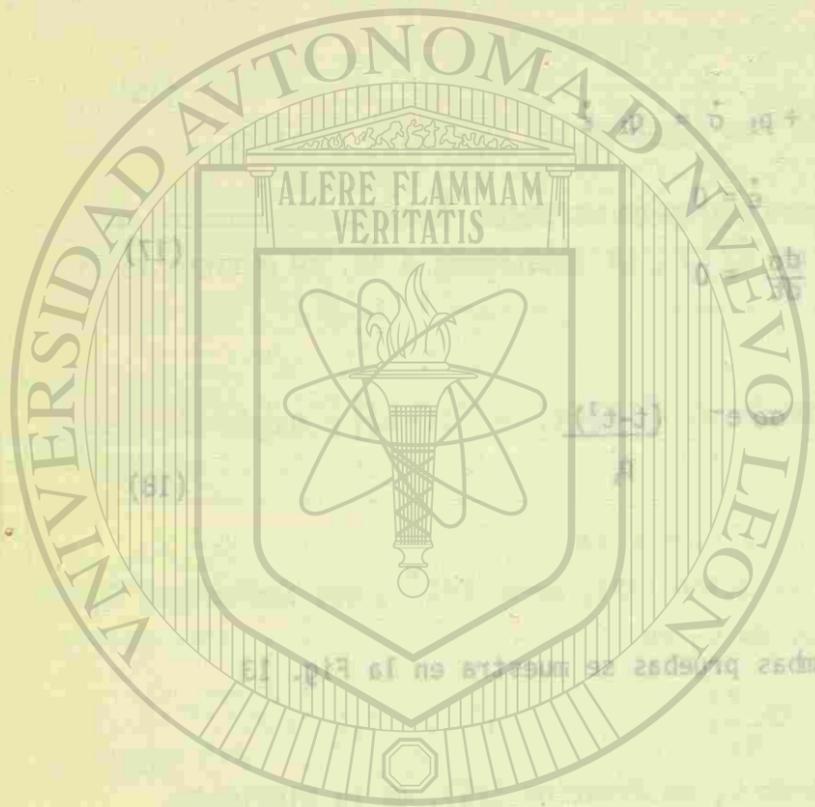


Fig. 13 Prueba estándar del modelo de Maxwell.

102111687

la prueba de relajación, indica que a un  $t_1$  la deformación se mantendrá constante y se verá como varía el esfuerzo con el tiempo.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Modelo de Kelvin

El modelo de Kelvin está constituido por un fluido elástico y un fluido viscoso ideal en paralelo.



En todo tiempo la deformación de los dos elementos es la misma, y el esfuerzo total es la suma de  $\sigma'$  y  $\sigma''$  cuando las Ecuaciones (5) y (6) se tienen.

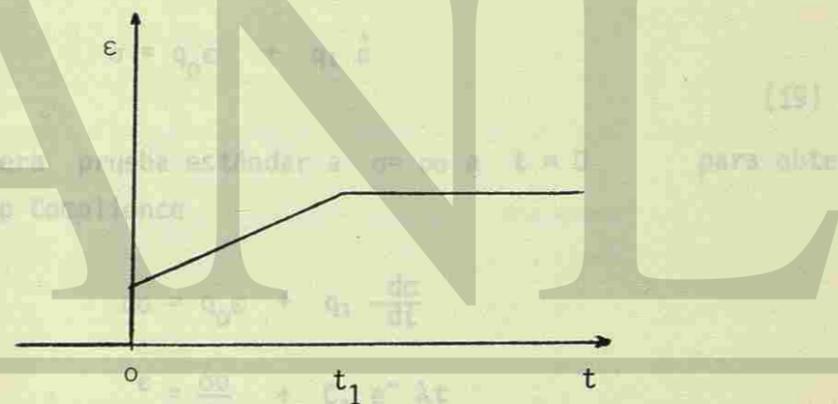
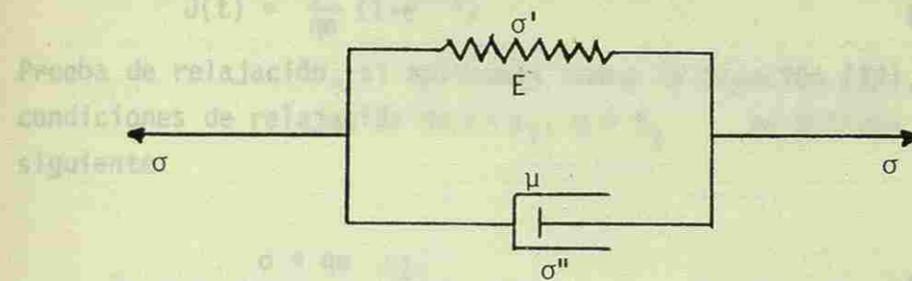


Fig. 13 Prueba estandar del modelo de Maxwell.

Modelo de Kelvin

El modelo de Kelvin está constituido por un fluido elástico ideal en paralelo con un fluido viscoso ideal



En todo tiempo la deformación  $\epsilon$  de los dos elementos es la misma, y el esfuerzo total  $\sigma$  es la suma de  $\sigma'$  y  $\sigma''$  aplicando las Ecuaciones (5) y (4), se tiene

$$\sigma = q_0 \epsilon + q_1 \dot{\epsilon} \tag{19}$$

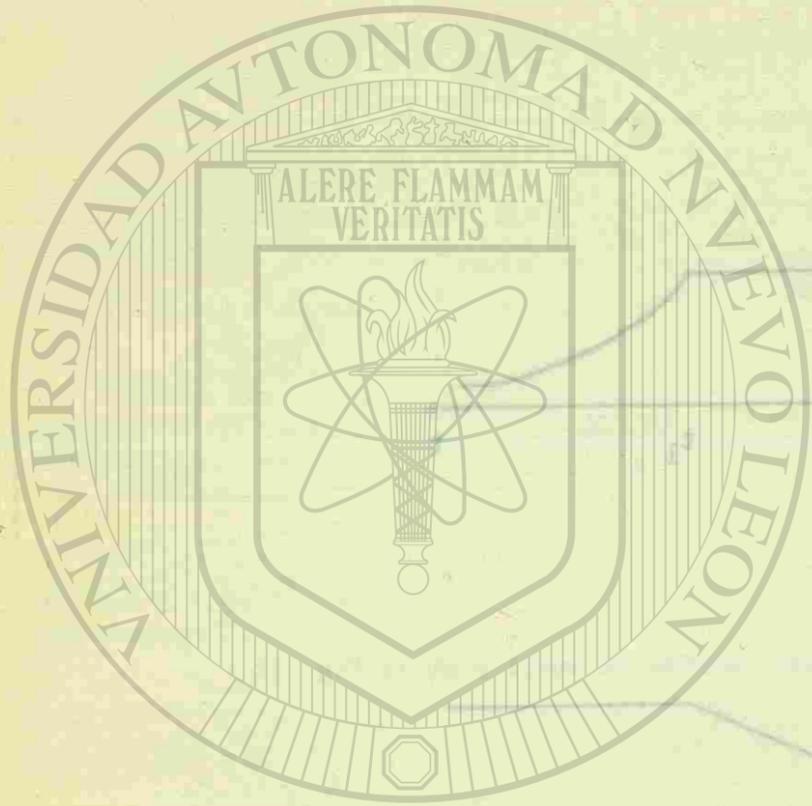
la primera prueba estándar a  $\sigma = \sigma_0$  a  $t = 0$  para obtener el Creep Compliance

$$\sigma_0 = q_0 \epsilon + q_1 \frac{d\epsilon}{dt}$$

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{\sigma_0}{q_0} + C_1 e^{-\lambda t} \\ \lambda &= \frac{q_0}{q_1} \end{aligned} \tag{20}$$

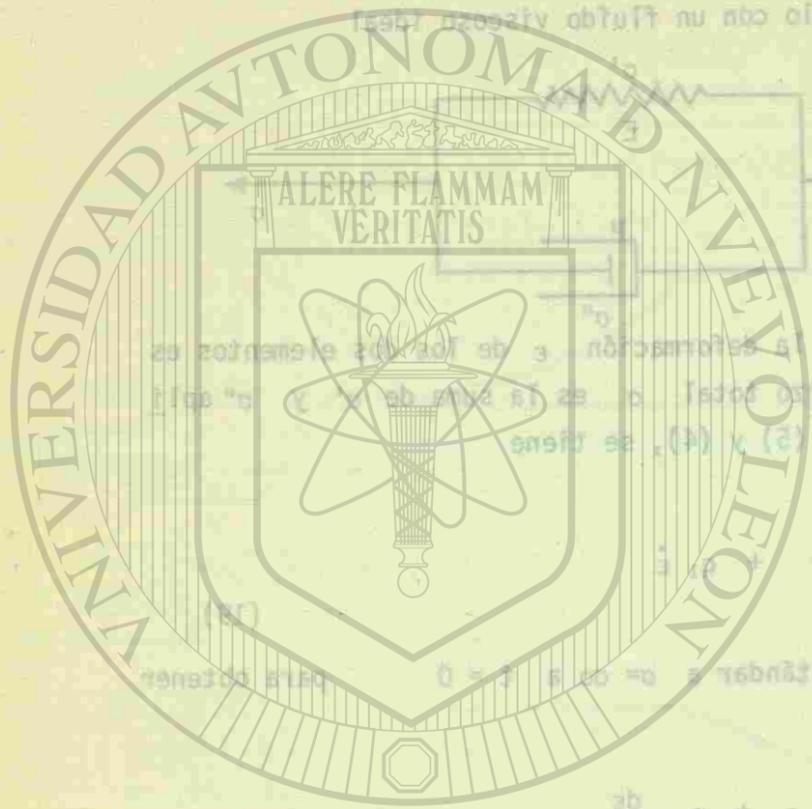
$$t = 0, \sigma = \sigma_0 \quad \epsilon = 0$$

$$C_1 = -\frac{\sigma_0}{q_0}$$



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Modelo de Kelvin



El modelo de Kelvin está constituido por un fluido viscoso y un resorte en paralelo con un fluido viscoso ideal.

En todo tiempo la deformación  $\epsilon$  de los elementos es la misma y el esfuerzo total  $\sigma$  es la suma de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  cuando las ecuaciones (5) y (6) se tienen

La primera prueba estándar es el Creep Compliance

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Sustituyendo

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{\sigma_0} (1 - e^{-\lambda t})$$

$$J(t) = \frac{1}{q_0} (1 - e^{-\lambda t}) \tag{21}$$

Prueba de relajación, si aplicamos sobre la Ecuación (19), las condiciones de relajación de  $\epsilon = \epsilon_1$ ,  $t = t_1$  se obtiene lo siguiente.

$$\sigma = q_0 \epsilon_1$$

$$\sigma = \sigma_0 (1 - e^{-\lambda t_1}) \tag{22}$$

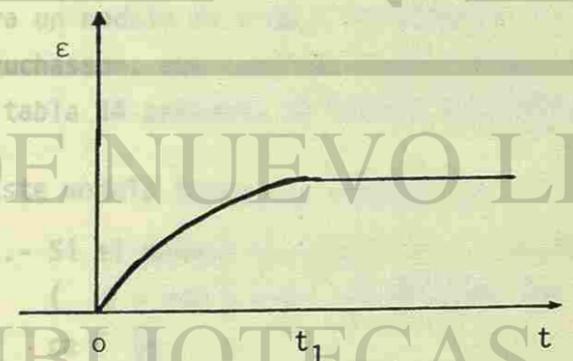
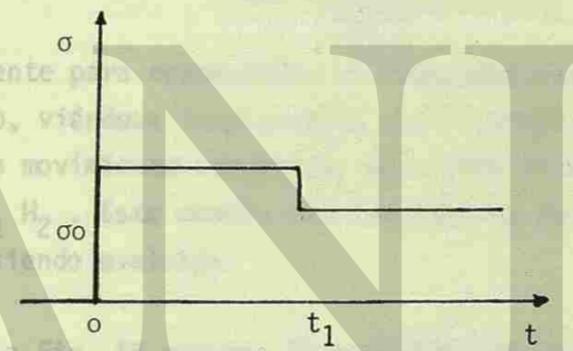
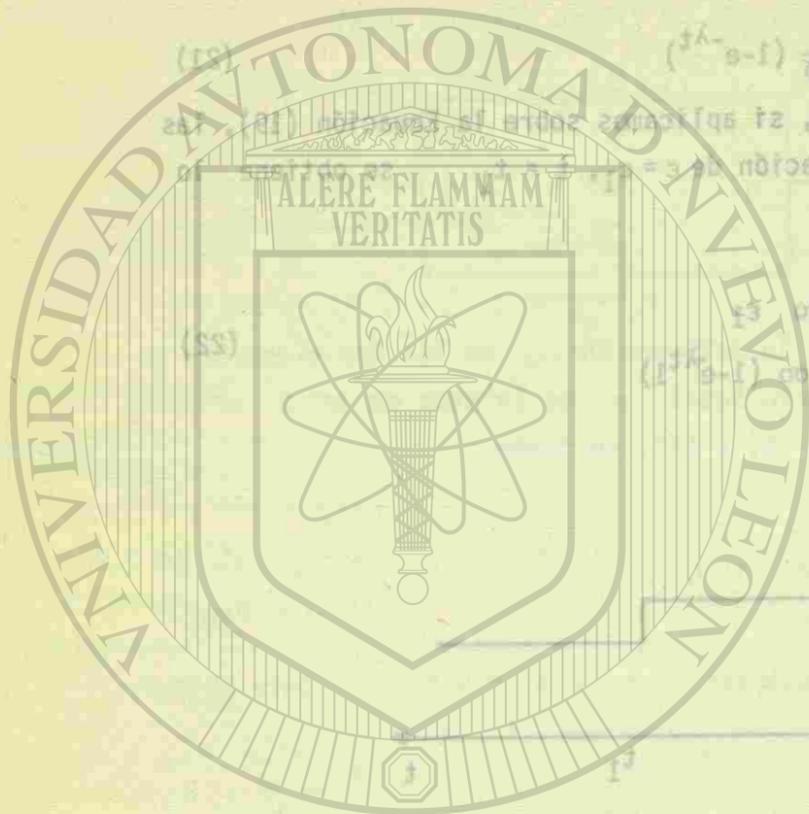


Fig. 14.- Prueba estándar al modelo de Kelvin.

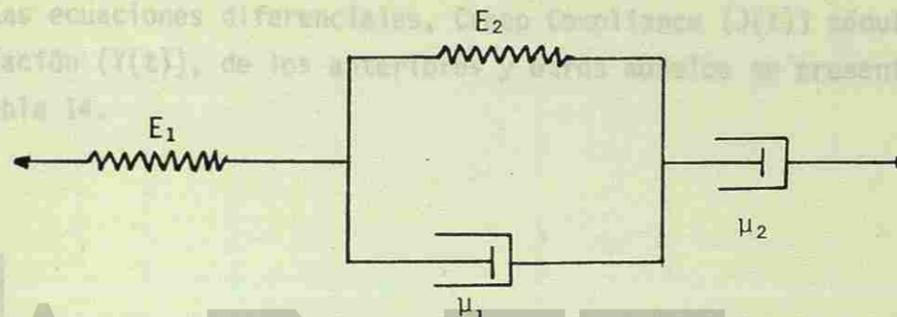


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Modelos combinados

J (t) y  $\gamma(t)$  son funciones materiales que pueden ser representadas por diversos modelos viscoelásticos y datos viscoelásticos del vidrio son sumamente escasos en la literatura. Merle y Truchasson (15) reportan que un modelo de cuatro parámetros del tipo



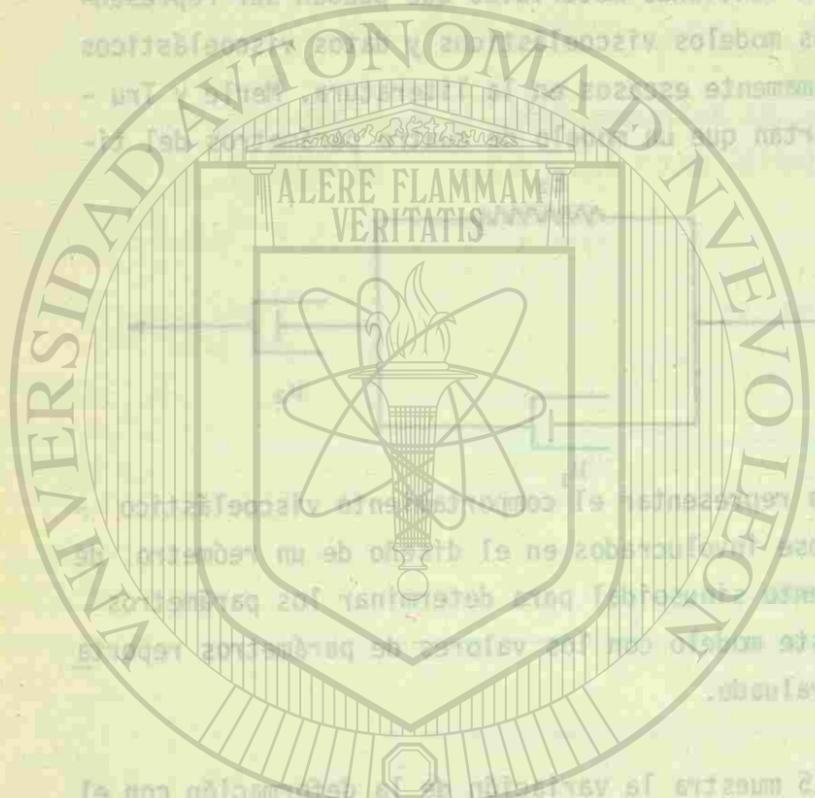
es suficiente para representar el comportamiento viscoelástico del vidrio, viéndose involucrados en el diseño de un reómetro de paleta con movimiento sinusoidal para determinar los parámetros  $E_1, E_2, \mu_1, \mu_2$ . Este modelo con los valores de parámetros reportados está siendo evaluado.

La Fig. 15 muestra la variación de la deformación con el tiempo para un modelo de cuatro parámetros del tipo reportado por Merle y Truchasson, que convina elasticidad, viscoelasticidad y flujo. La tabla 14 presenta el modelo matemático.

Este modelo tiene las siguientes características.

- 1.- Si el modelo es sometido a un esfuerzo constante ( $\sigma = cte$ ) a  $t_1$ , se produce una deformación elástica ( $\frac{\sigma}{E_1}$ ).
- 2.- Lo siguiente es una deformación viscoelástica que se aproxima a ( $\sigma/E_2$ ) como valor de equilibrio y un flujo viscoso ( $\sigma/\mu_2$ ).

Fig. 15. Relación de la deformación con el tiempo para un modelo de cuatro parámetros del tipo reportado por Merle y Truchasson. Si a  $t_1$  se expone el modelo a un  $\sigma = cte$  y en  $t_2$  se mide el esfuerzo (16).



Modelos combinados

$\epsilon(t)$  y  $\dot{\epsilon}(t)$  son funciones materiales que pueden ser representadas por diversos modelos viscoelásticos. Los modelos viscoelásticos del vidrio son sumamente resistentes y se caracterizan por su comportamiento elástico y viscoso.

La Fig. 15 muestra la variación de la deformación con el tiempo para un modelo de cuatro parámetros del tipo propuesto por Merle y Truchasson, que consiste en un elemento elástico y un elemento viscoelástico en serie. Este modelo tiene los siguientes parámetros:  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\mu_1$  y  $\mu_2$ . Este modelo con los valores de los parámetros reportados en la Tabla 14.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El elemento elástico produce una deformación instantánea  $\epsilon_0$  y el elemento viscoelástico produce una deformación retardada  $\epsilon_r$  que depende del tiempo  $t$  de la siguiente manera:  $\epsilon_r = \frac{\sigma}{\mu} (1 - e^{-\mu t})$  donde  $\sigma$  es el esfuerzo aplicado y  $\mu$  es el coeficiente de relajación.

- 3.- Al suprimir el esfuerzo constante a un tiempo  $t_2$ , el elemento elástico se relaja inmediatamente.
- 4.- El elemento viscoelástico se relaja lentamente.
- 5.- El flujo viscoso no se recupera.

Las ecuaciones diferenciales, Creep Compliance ( $J(t)$ ) módulos de relajación ( $Y(t)$ ), de los anteriores y otros modelos se presentan en la tabla 14.

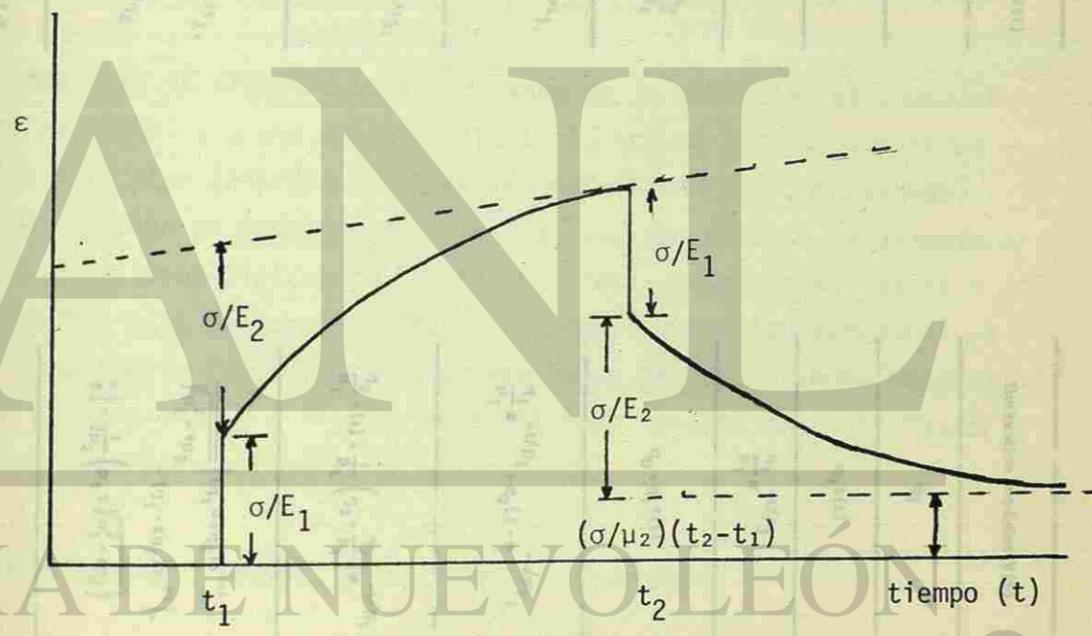


Fig. 15 Relación teórica, deformación - tiempo para un modelo mecánico de cuatro parámetros del tipo propuesto por Merle y Truchasson, a  $t_1$  se expone el modelo a un  $\sigma = cte$  y en  $t_2$  se elimina el esfuerzo (16).

Tabla 14. Modelos viscoelásticos con sus correspondientes ecuaciones diferenciales, Creep Compliance y módulos de relajación y compliance compleja (17).

Model	Name	Differential equation	Creep compliance $J(t)$	Complex compliance		
		Inequalities		Relaxation modulus $Y(t)$	Real part $J'(w)$	Imaginary part $J''(w)$
	Elastic solid	$\sigma = q_0 \epsilon$	$1/q_0$	$q_0$	$1/q_0$	0
	Viscous fluid	$\dot{\epsilon} = q_1 \dot{\epsilon}$	$1/q_1$	$q_1 \omega$	0	$-1/q_1$
	Maxwell fluid	$\sigma + p_1 \dot{\epsilon} = q_1 \dot{\epsilon}$	$(p_1 + 1)/q_1$	$q_0 + q_1 \omega$	$q_0$	$-1/q_1$
	Kelvin solid	$\sigma = q_0 \epsilon + q_1 \dot{\epsilon}$	$\frac{1}{q_0} (1 - e^{-t/\tau})$ , $\tau = \frac{p_1}{q_1}$	$q_0 + q_1 \omega$	$\frac{q_0}{q_0^2 + q_1^2 \omega^2}$	$-\frac{q_1 \omega}{q_0^2 + q_1^2 \omega^2}$
	3-parameter solid	$\sigma + p_1 \dot{\epsilon} = q_1 \dot{\epsilon} + q_2 \epsilon$	$\frac{p_1}{q_1} e^{-t/\tau_1} + \frac{1}{q_0} (1 - e^{-t/\tau_1})$ , $\tau_1 = q_1/q_2$	$q_0 + q_1 \omega$	$\frac{q_0}{q_0^2 + q_1^2 \omega^2}$	$-\frac{q_1 \omega}{q_0^2 + q_1^2 \omega^2}$
	4-parameter fluid	$\sigma + p_1 \dot{\epsilon} = q_1 \dot{\epsilon} + q_2 \dot{\epsilon}$	$\frac{1}{q_1} \frac{p_1 + 1}{q_2} (1 - e^{-t/\tau_1})$ , $\tau_1 = q_1/q_2$	$q_0 + q_1 \omega$	$\frac{q_0}{q_0^2 + q_1^2 \omega^2}$	$-\frac{q_1 \omega}{q_0^2 + q_1^2 \omega^2}$
	4-parameter solid	$\sigma + p_1 \dot{\epsilon} = q_1 \dot{\epsilon} + q_2 \epsilon$	$\frac{1}{q_1} \frac{p_1 + 1}{q_2} (1 - e^{-t/\tau_1})$ , $\tau_1 = q_1/q_2$	$q_0 + q_1 \omega$	$\frac{q_0}{q_0^2 + q_1^2 \omega^2}$	$-\frac{q_1 \omega}{q_0^2 + q_1^2 \omega^2}$

3.- Al suprimir el esfuerzo constante a un tiempo  $t_0$ , el elemento elástico se relaja inmediatamente.

4.- El elemento viscoelástico se relaja lentamente.  
 5.- El flujo viscoso no se relaja lentamente.  
 Las ecuaciones de relajación de los modelos se presentan en la tabla 14.



Fig. 15. Relajación teórica, deformación - tiempo para un modelo mecánico de cuatro parámetros del tipo propuesto por Morje y Truchasson. A  $t_0$  se expone el modelo a un  $\epsilon = \epsilon_0$  y en  $t_1$  se elimina el esfuerzo (16).



Modelo de Lennard-Jones. tiempo se puede comparar la relajación

Otro intento de explicar el comportamiento viscoelástico del vidrio, es el presentado por S.M. Rekhson, y colaboradores (19) en el XII Congreso Internacional sobre vidrio.

Se ha demostrado que una función empírica muy satisfactoria de la energía potencial de interacción entre dos moléculas es el "Potencial (6-12) de Lennard-Jones".

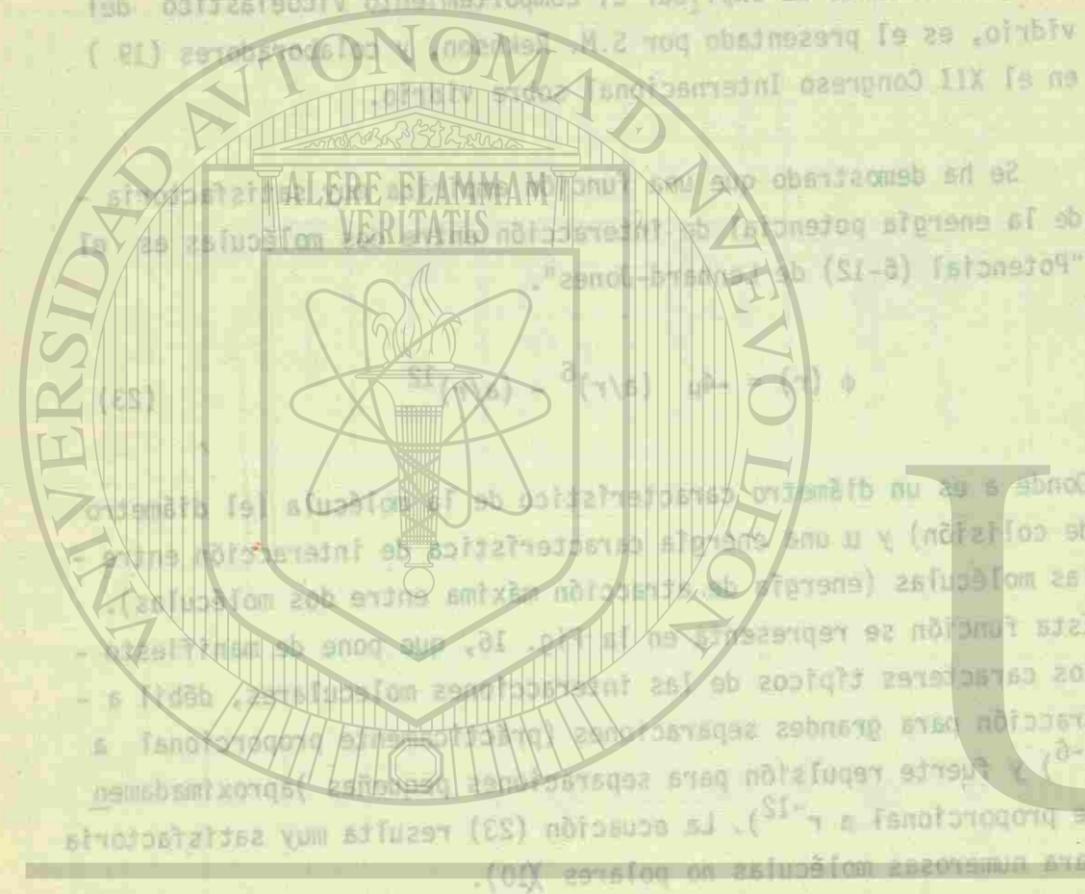
$$\phi(r) = -4\mu (a/r)^6 - (a/r)^{12} \quad (23)$$

Donde  $a$  es un diámetro característico de la molécula (el diámetro de colisión) y  $\mu$  una energía característica de interacción entre las moléculas (energía de atracción máxima entre dos moléculas). Esta función se representa en la Fig. 16, que pone de manifiesto los caracteres típicos de las interacciones moleculares, débil atracción para grandes separaciones (prácticamente proporcional a  $r^{-6}$ ) y fuerte repulsión para separaciones pequeñas (aproximadamente proporcional a  $r^{-12}$ ). La ecuación (23) resulta muy satisfactoria para numerosas moléculas no polares (10).

Comportamiento lineal, Relajación de Esfuerzos. (25)

Considerando primero el comportamiento lineal a pequeños esfuerzos y deformaciones. La Fig. 17 muestra la relajación de esfuerzos cuando una deformación es aplicada en un instante  $t=0$  y es mantenida constante.

en detalle para ver si el modelo que ellos proponen predice con exactitud el comportamiento viscoelástico del vidrio.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Ajustando escalas de tiempo se puede comparar la relajación de esfuerzos para el modelo de Lennard-Jones y para sílica fundida. Los datos usados para el SiO<sub>2</sub> son los reportados por Lenko y Mescheryakova (20).

Viscosidad.

El próximo paso es aplicar el modelo LJ a alguna de las ecuaciones de teoría lineal de viscoelasticidad, las cuales son válidas para vidrios inorgánicos. La ecuación deberá relacionar la relajación de esfuerzos normalizado,  $\phi(t)$ , el módulo de elasticidad,  $E_{\infty}$ , la viscosidad del material es.

$$\eta = E_{\infty} \int_0^{\infty} dt \phi(t) \tag{24}$$

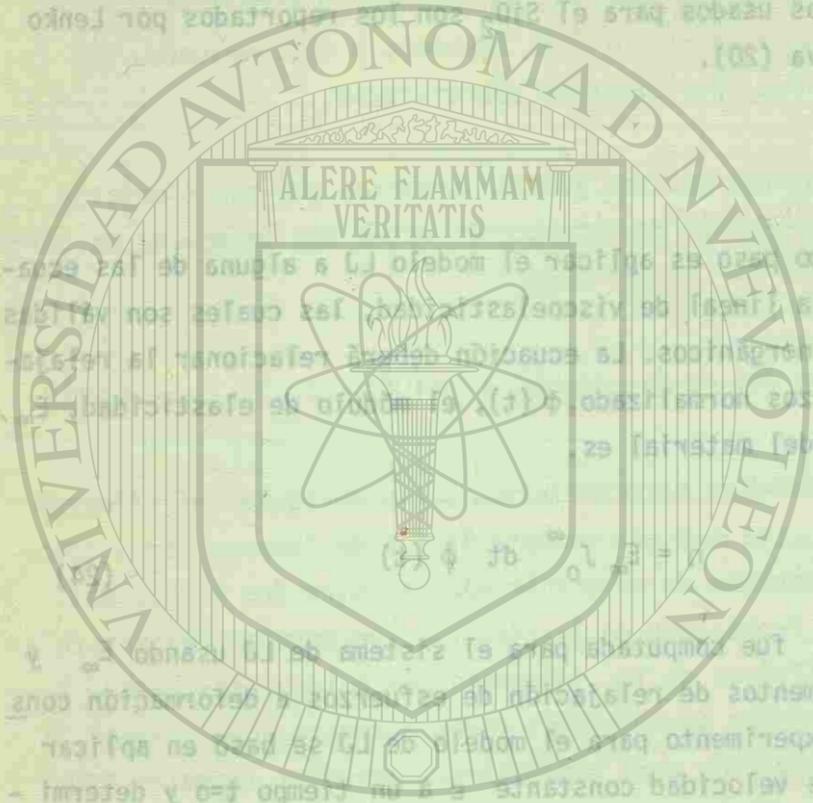
En ref. (20)  $\eta$  fue computada para el sistema de LJ usando  $E_{\infty}$  y  $\theta(t)$  de experimentos de relajación de esfuerzos a deformación constante  $\epsilon$ . El experimento para el modelo de LJ se basó en aplicar un gradiente de velocidad constante  $\epsilon$  a un tiempo  $t=0$  y determinar el esfuerzo como respuesta.

$$\sigma(t) = \dot{\epsilon} E_{\infty} \int_0^t dt' \phi(t') \tag{25}$$

La Ecuación (24) a  $t \rightarrow \infty$ ,  $\sigma(t \rightarrow \infty) / \dot{\epsilon} = \eta = E_{\infty} \int_0^{\infty} dt \theta(t)$  es mostrada en fig. 18, la pendiente inicial es  $E_{\infty} \dot{\epsilon}$  y a tiempos grandes es  $\eta \cdot \dot{\epsilon}$ .

El estudio de S.M. Rekhson y colaboradores (19) se está analizando en detalle para ver si el modelo que ellos proponen predice con exactitud el comportamiento viscoelástico del vidrio.

Agustado escalar de tiempo se puede comparar la relajación de esfuerzos para el modelo de Leonard-Jones y para sílica fundida. Los datos usados para el sílice son los reportados por Lenko y Mesocherakova (20).



Viscosidad.

El próximo paso es aplicar el modelo LJ a algunas de las ecuaciones de teoría cinética de viscosidad, las cuales son válidas para líquidos simples. La ecuación de relajación de esfuerzos de esfuerzos normalizados  $\phi(t)$  en función de la viscosidad de la viscosidad del material es:

En ref. (20) se muestra para el sistema de LJ cuando  $\phi(t)$  de experimentos de relajación de esfuerzos y deformación constante. El experimento para el modelo LJ se hizo en aplicar un gradiente de velocidad constante a un tiempo fijo y determinar el esfuerzo como respuesta.

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

La ecuación (24) a  $t = \infty$ ,  $\phi = 0$  y  $d\phi/dt = 0$  es mostrada en fig. 18, la pendiente inicial es  $E_0$  y a tiempos gran...

## DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El estudio de S.M. Reilly y colaboradores (19) se está analizando en detalle para ver si el modelo que ellos proponen predice con exactitud el comportamiento viscoelástico del vidrio.

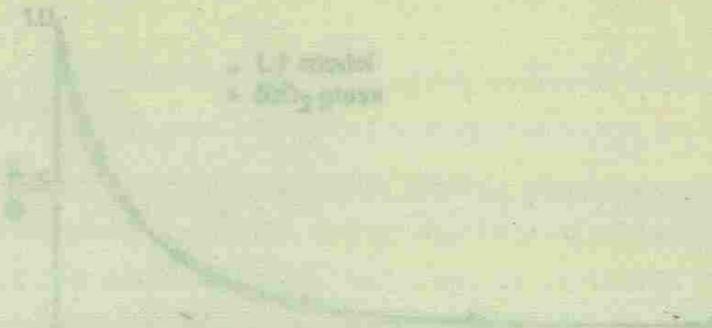


Fig. 17

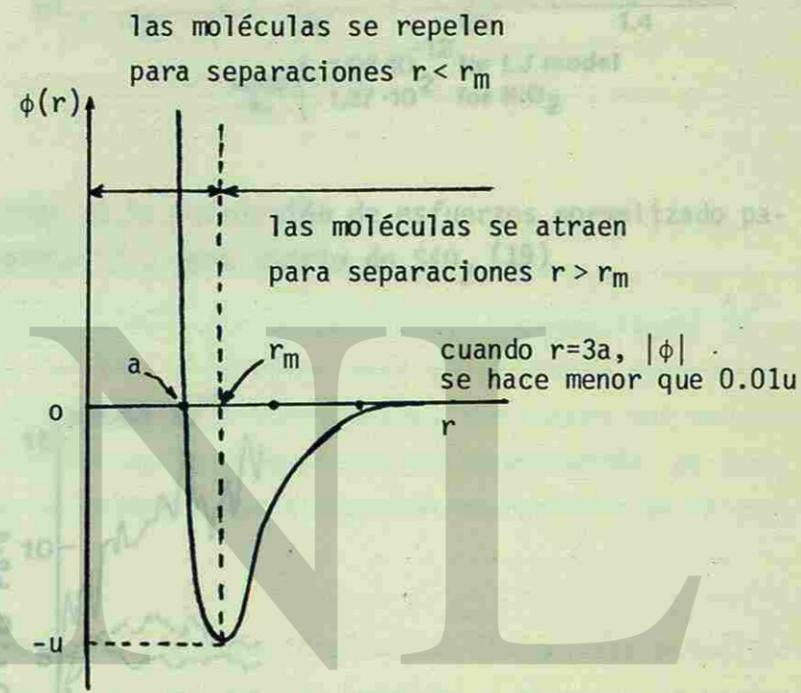
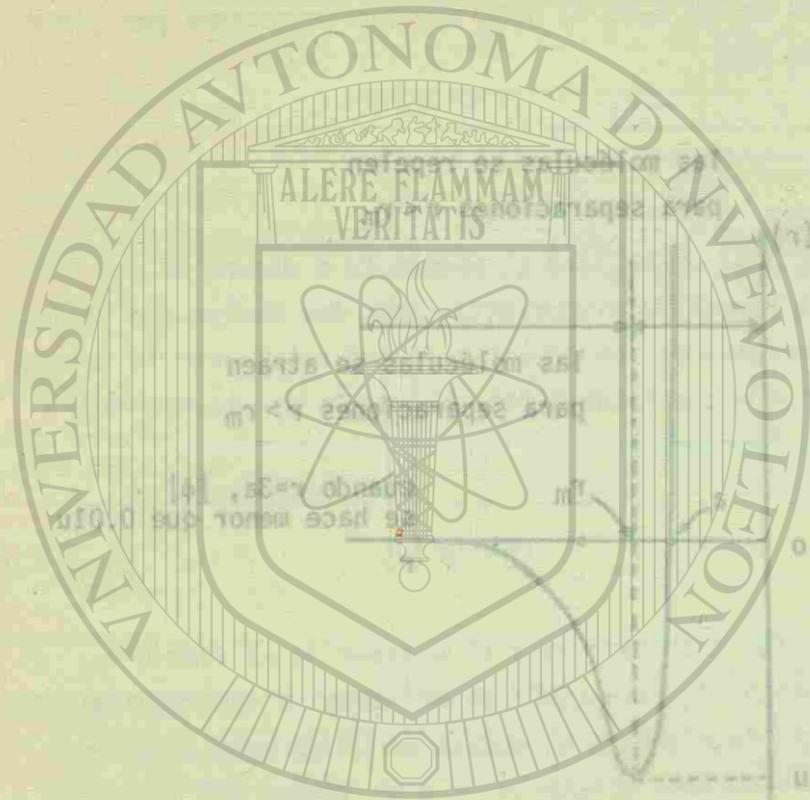


Fig. 16. Función de energía potencial que describe la interacción de dos moléculas esféricas no polares. La Ecuación (23) es una de las muchas ecuaciones empíricas propuestas para el ajuste de esta curva. (10)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Fig. 16. Función de energía potencial que describe la interacción de dos moléculas esféricas no polares. La ecuación (19) es una de las muchas ecuaciones empíricas propuestas para el ajuste de esta curva (19).

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

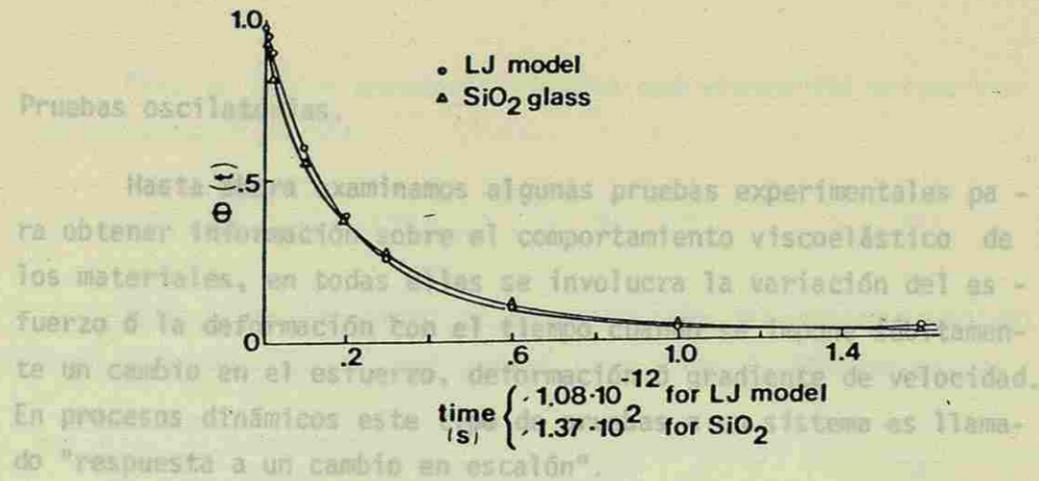


Fig. 17 Comparación de la Relajación de esfuerzos normalizado para el modelo LJ y para vidrio de SiO<sub>2</sub>. (19).



Fig. 18 Dependencia del tiempo del esfuerzo,  $\sigma(t)/\dot{\epsilon}$  para el modelo de Lennard-Jones (19)

$$\dot{\epsilon} = 4.4 \times 10^{10} \text{ s}^{-1} \quad (26)$$

$$\dot{\epsilon} = 1.6 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$$

$$\dot{\epsilon} = 3.32 \times 10^{11} \text{ s}^{-1} \quad (27)$$

Pruebas oscilatorias.

Hasta ahora examinamos algunas pruebas experimentales para obtener información sobre el comportamiento viscoelástico de los materiales, en todas ellas se involucra la variación del esfuerzo ó la deformación con el tiempo cuando se impone súbitamente un cambio en el esfuerzo, deformación ó gradiente de velocidad. En procesos dinámicos este tipo de pruebas a un sistema es llamado "respuesta a un cambio en escalón".

Un tipo alternativo de pruebas dinámicas es la aplicación de una excitación oscilatoria tipo senoidal al sistema y observar la respuesta como función del tiempo. En un sistema lineal la respuesta también deberá ser Senoidal pero generalmente está fuera de fase y atenuada en amplitud. Cuando estas cantidades son estudiadas como una función de la frecuencia, de la excitación, se dice que se estudia la dinámica del sistema en el "dominio de la frecuencia".

Una prueba oscilatoria ideal de un fluido viscoelástico consiste en imponerle una deformación senoidal y observar la variación del esfuerzo.

En un experimento oscilatorio, la deformación ( $\epsilon$ ) en función de la frecuencia ( $\omega$ ) es.

$$\epsilon = \epsilon_0 \text{ sen } \omega t \tag{26}$$

El gradiente de velocidad es.

$$\dot{\epsilon} = \epsilon_0 \omega \text{ cos } \omega t = \dot{\epsilon}_0 \text{ cos } \omega t \tag{27}$$

$$\frac{\dot{\epsilon}_0}{\epsilon_0} = f_2(\omega) \tag{28}$$

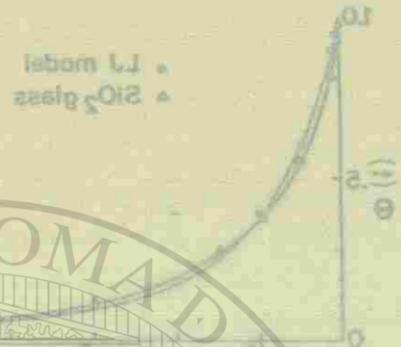


Fig. 17 Comparación de la relación de esfuerzos normalizados para el modelo L.J. y para vidrio de Sto. (19)



Fig. 18 Dependencia del tiempo del esfuerzo,  $\sigma(t)$  para el modelo de Lennard-Jones (19)

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Para un fluido puramente viscoso con viscosidad extensional,  $\eta$ , el esfuerzo debe ser

$$\sigma = \eta \dot{\epsilon} = \eta \dot{\epsilon}_0 \cos \omega t = \sigma_0 \cos \omega t \quad (28)$$

Esto es desfasado  $90^\circ$  con respecto a la deformación senoidal aplicada y la relación de amplitud es lineal con la frecuencia.

$$\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} = \eta \omega \quad (29)$$

Para un material puramente elástico con módulo de Young  $E$ , el esfuerzo debe ser

$$\sigma = E \epsilon = E \epsilon_0 \sin \omega t \quad (30)$$

En este caso el esfuerzo está en fase con respecto a la deformación aplicada y la relación de amplitud constante e igual a  $E$ .

Para los materiales viscoelásticos el esfuerzo obtenido es intermedio entre el de un material puramente viscoso y elástico.

Si se tiene un comportamiento viscoelástico lineal, la respuesta en general puede ser representada por

$$\sigma = \sigma_0 \sin (\omega t + \phi) \quad (31)$$

En experimentos oscilatorios de pequeña amplitud pueden medirse dos funciones materiales, el defasamiento y la relación de amplitud como una función de la velocidad de corte.

$$\phi = f_1 (\omega) \quad (32)$$

$$\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} = f_2 (\omega) \quad (33)$$

Para un fluido puramente viscoso con viscosidad extensiva, el esfuerzo debe ser

$$\sigma = \eta \dot{\epsilon} \quad (28)$$

Esta es desfasada 90° con respecto a la deformación senoidal aplicada y la relación de amplitud es constante y igual a E.

$$\sigma_0 = E \epsilon_0 \quad (29)$$

Para un material puramente elástico con módulo de Young E, el esfuerzo debe ser

$$\sigma = E \epsilon \quad (30)$$

En este caso el esfuerzo está en fase con respecto a la deformación aplicada y la relación de amplitud es constante e igual a E.

Para los materiales viscoelásticos el esfuerzo obtenido es intermedio entre el de un material puramente viscoso y elástico.

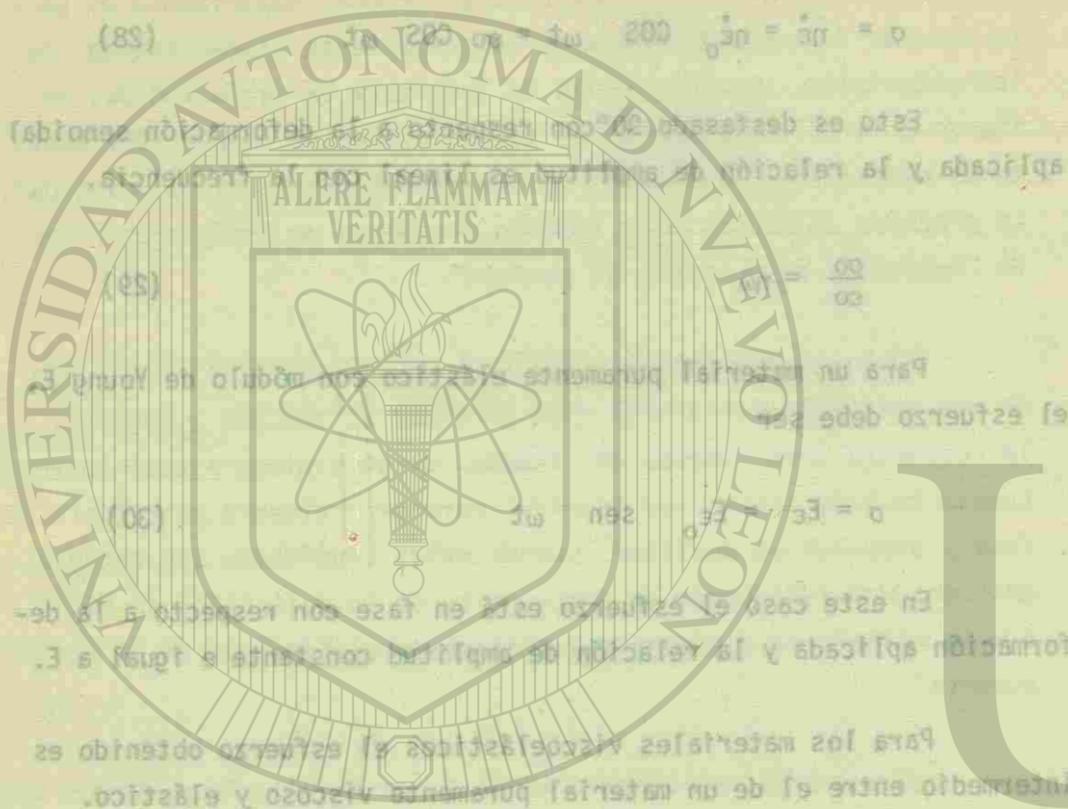
Si se tiene un comportamiento viscoelástico lineal, la respuesta en general puede ser representada por

$$\sigma = \epsilon_0 \cos(\omega t + \phi) \quad (31)$$

En experimentos oscilatorios de pequeña amplitud pueden obtenerse dos funciones materiales, el desfase  $\phi$  y la relación de amplitud  $\sigma_0/\epsilon_0$  como una función de la velocidad de corte.

$$\phi = \phi(\omega) \quad (32)$$

$$\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} = \xi(\omega) \quad (33)$$



Los experimentos senoidales pueden también ser expresados en términos de una "compliance compleja"

La componente en fase  $\sigma'$  real  $\eta'$  es llamada viscosidad dinámica, muy usada especialmente en el estudio de polímeros lineales - (21), porque estos sistemas a muy bajas frecuencias  $\eta'$  se aproxima a

$$\eta^* = \frac{\sigma^*}{\dot{\epsilon}_0} = \frac{\sigma'}{\dot{\epsilon}_0} + i \frac{\sigma''}{\dot{\epsilon}_0} = \eta' - i \eta'' \quad (36)$$

Ahora podemos definir una "viscosidad compleja" como.

$$G^* = \frac{\gamma_0}{\dot{\epsilon}_0} = G' + i G'' \quad (35)$$

La parte real de  $\sigma^*$  corresponde a la componente en fase del esfuerzo, y la imaginaria corresponde a la defasada. Con esto podemos definir un "módulo complejo" como.

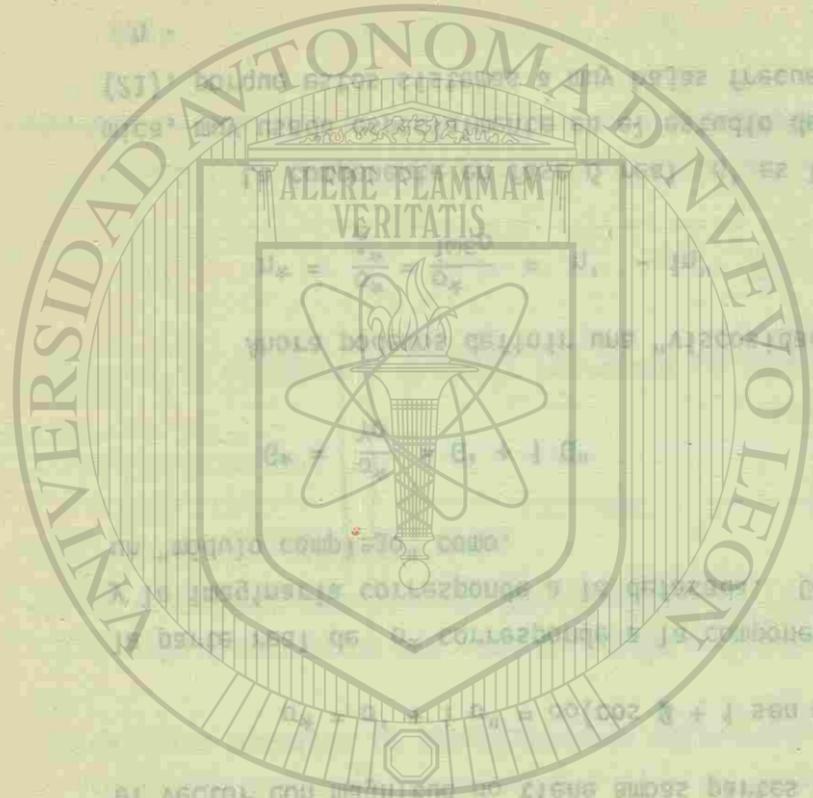
$$\sigma^* = \sigma' + i \sigma'' = \epsilon_0 (\cos \phi + i \sin \phi) \quad (34)$$

el vector con magnitud  $\sigma_0$  tiene ambas partes real e imaginaria. Ahora - carse en un plano complejo con  $\gamma_0$  en el eje real, Fig. 20. Los -

La rotación de los vectores de deformación  $\epsilon(t)$  y esfuerzo  $\sigma(t)$  genera las curvas características del material Fig. 19. Los - vectores de magnitud  $\gamma_0$  y  $\sigma_0$ , defasados un ángulo  $\phi$ , pueden colocarse en un plano complejo con  $\gamma_0$  en el eje real, Fig. 20. Ahora -

una defasada (viscosa). componer el esfuerzo obtenido en una componente en fase (elástica) y

calcular otras funciones con mayor significado físico, tales como desamplitud como una función de la temperatura. Sin embargo es más común la interpretación de los resultados experimentales en una prueba oscilatoria pueden presentar simplemente el desfase  $\phi$  y la relación de amplitud como una función de la temperatura. Sin embargo es más común calcular otras funciones con mayor significado físico, tales como descomponer el esfuerzo obtenido en una componente en fase (elástica) y una defasada (viscosa).



$$J^* = \frac{\gamma^*}{\sigma_0} = \frac{1}{G^*} \quad (37)$$

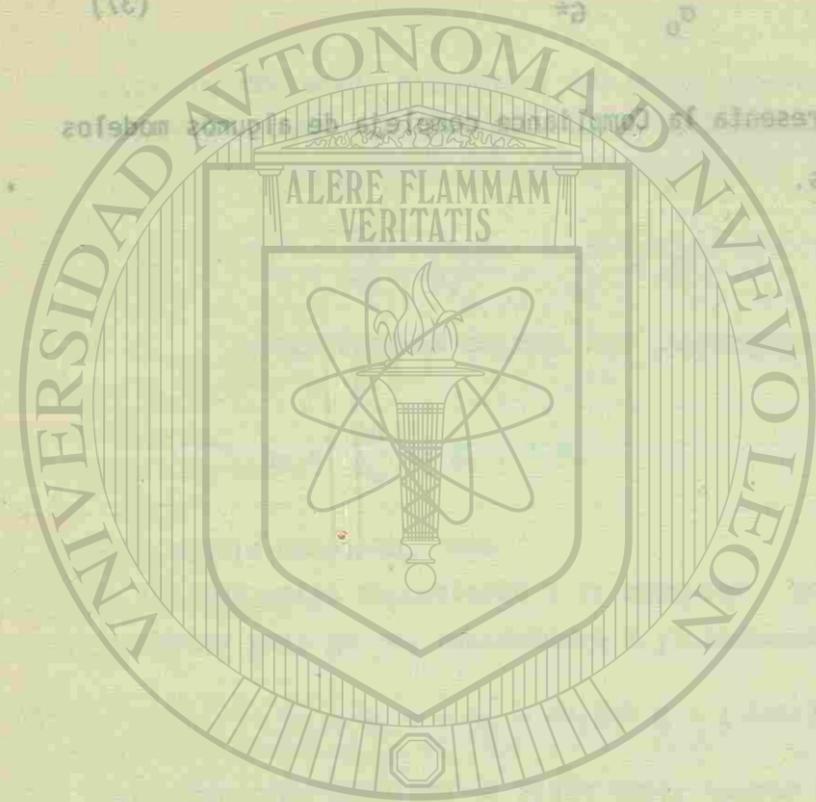
La tabla 14 presenta la Compliance compleja de algunos modelos viscoelásticos.

U A N L

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



La tabla 14 presenta la comparación de los modelos viscoelásticos.

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}$$

(17)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

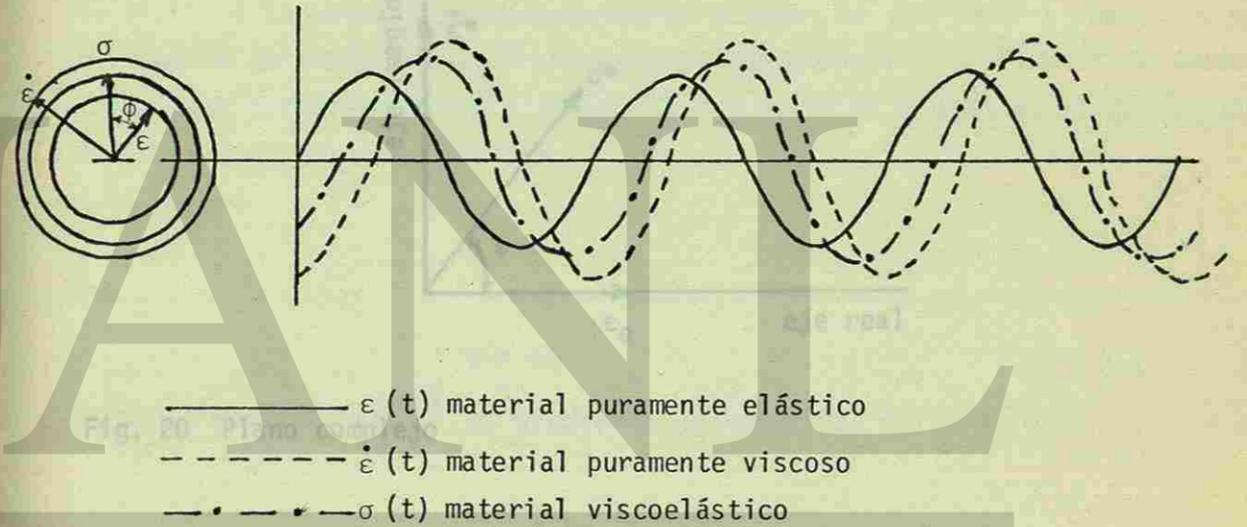
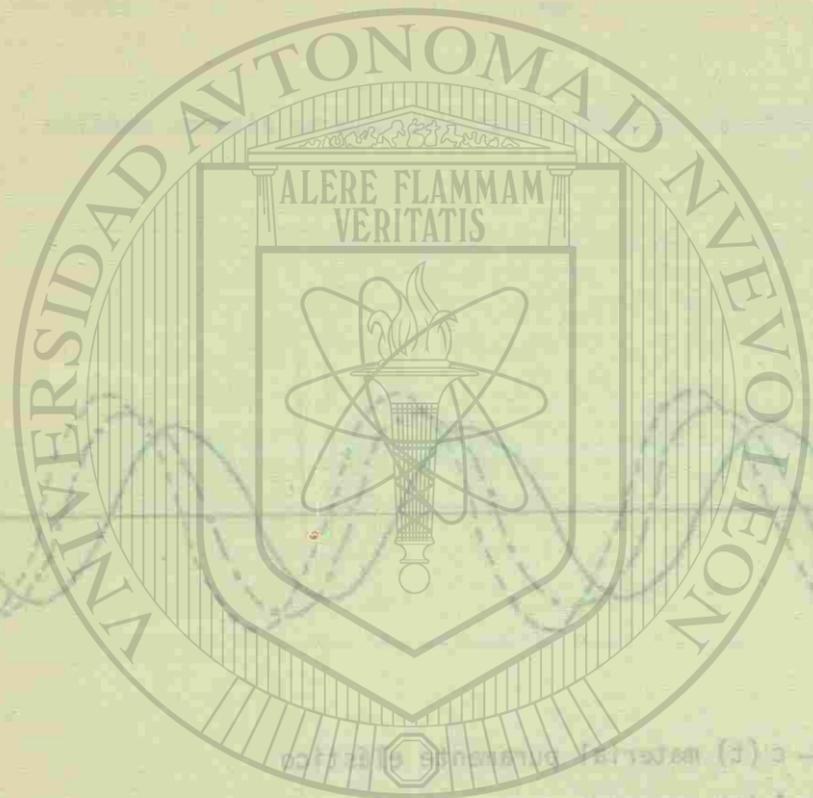


Fig. 19 Prueba oscilatoria.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO III. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EXTENSIOMETRO PARA VIDRIO FUNDIDO

Es conveniente para la determinación experimental de la viscosidad extensional y de los parámetros viscoelásticos, el diseñar un extensímetro para producir flujo extensional a una muestra de vidrio y mantener el esfuerzo ó el gradiente de velocidad constante y medir la respuesta del resultante.

a.- Bases del diseño.

La primera consideración de diseño, es sin lugar a dudas, la generación de flujo extensional. La geometría de la muestra queda delimitada por el perfil de velocidad en donde el perfil de velocidad...

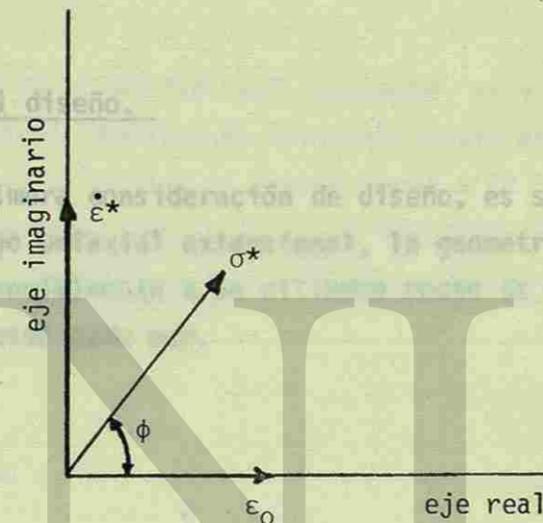


Fig. 20 Plano complejo

$$\dot{\epsilon} = \frac{d \ln L}{dt} \frac{L_0}{L}$$

(39)

donde L es la longitud del cilindro en cualquier tiempo y L<sub>0</sub> la longitud inicial de la muestra.

La viscosidad extensional se define como

$$\eta_e = \frac{\sigma}{\dot{\epsilon}}$$

(40)

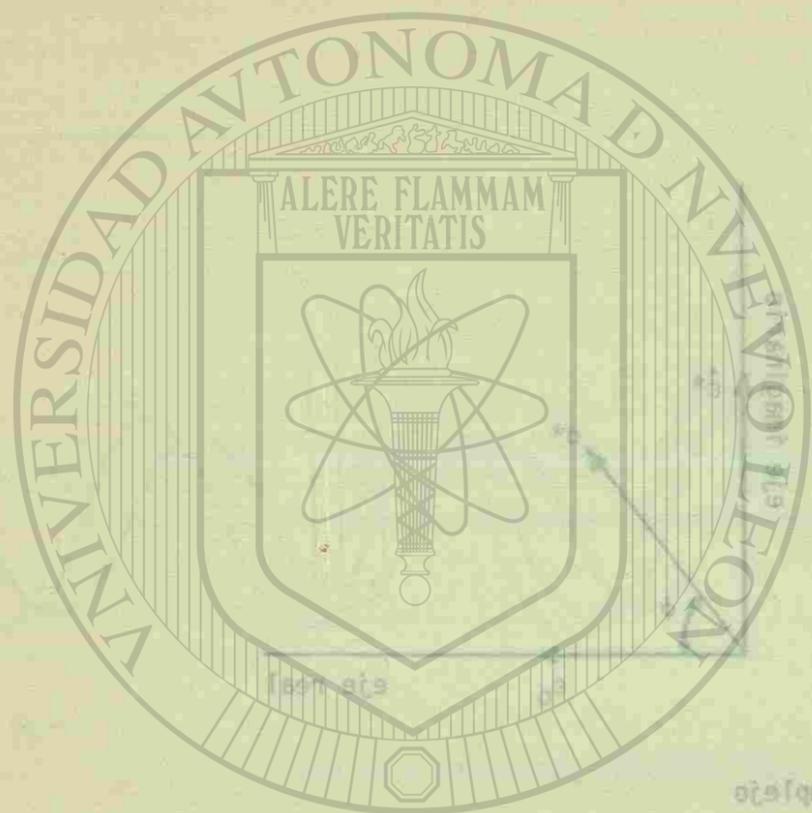


Fig. 50. Plano completo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO III. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EXTENSIOMETRO PARA VIDRIO FUNDIDO

donde  $F/A$  es el esfuerzo aplicado a la muestra, siendo,  $F$  la fuerza de tracción aplicada y  $A$  el Área de sección transversal del cilindro.

Es conveniente para la determinación experimental de la viscosidad extensional y de los parámetros viscoelásticos, el diseñar un extensiómetro para producir flujo extensional a una muestra de vidrio y mantener el esfuerzo ó el gradiente de velocidad constante y medir la respuesta del resultante.

a.- Bases del diseño.

El gradiente de velocidad será constante, si y solo si, el perfil de velocidad del vidrio fundido al estirarse satisface la ecuación (38), es decir, solo

La primera consideración de diseño, es sin lugar a dudas, la generación de flujo uniaxial extensional, la geometría de la muestra queda delimitada preferencialmente a un cilindro recto de vidrio en donde el perfil de velocidad esté dado por.

$$v = \dot{\epsilon}L \tag{38}$$

siendo  $v$  = velocidad,  $\dot{\epsilon}$  el gradiente de velocidad definido como

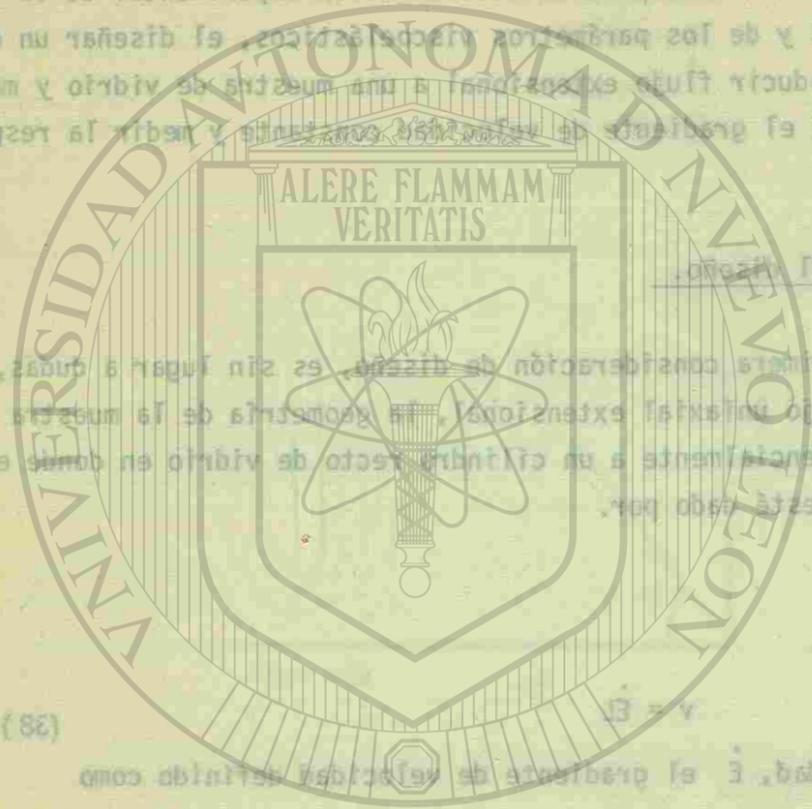
$$\dot{\epsilon} = \frac{d \ln L}{dt} \frac{L}{L_0} \tag{39}$$

donde  $L$  es la longitud del cilindro en cualquier tiempo y  $L_0$  la longitud inicial de la muestra:

La viscosidad extensional uniaxial se define como

$$n_e = \frac{F/A}{\dot{\epsilon}} \tag{40}$$

Es conveniente para la determinación experimental de la viscosidad extensional y de los parámetros viscosos, el diseñar un extensivómetro para producir flujo extensional a una muestra de vidrio y mantener el esfuerzo o el gradiente de velocidad constante y medir la respuesta del resultante.



La primera consideración de diseño es sin lugar a dudas, la generación de flujo extensional. La geometría de la muestra queda delimitada pretensionalmente a un cilindro recto de vidrio en donde el perfil de velocidad está dado por:

(38)

siendo  $v$  = velocidad.  $\dot{\epsilon}$  el gradiente de velocidad definido como

(39)

$$\dot{\epsilon} = \frac{dv}{dx} = \frac{v}{L}$$

donde  $L$  es la longitud del cilindro en cualquier tiempo y  $L_0$  la longitud inicial de la muestra.

### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

(40)

$$\frac{v}{L} = \frac{v_0}{L_0} e^{\dot{\epsilon} t}$$

Una manera de obtener este perfil de velocidad sería mediante el

donde  $F/A$  es el esfuerzo aplicado a la muestra, siendo,  $F$  la fuerza de tracción aplicada y  $A$  el área de sección transversal del cilindro.

Es condición necesaria para el cálculo de la viscosidad extensional, el mantener el esfuerzo o el gradiente de velocidad constante y medir la respuesta del resultante.

El gradiente de velocidad será constante, sí y solo sí, el perfil de velocidad del vidrio fundido al estirarse satisface la ecuación (38), es decir, solo si la velocidad es proporcional a la longitud de la muestra en cualquier instante. Manipulando la ecuación (38) obtenemos:

$$v = \frac{dL}{dt} = \dot{\epsilon} L \tag{41}$$

$$\frac{dL}{L} = \dot{\epsilon} dt \tag{42}$$

$$\ln \frac{L}{L_0} = \dot{\epsilon} t. \tag{43}$$

$$L = L_0 e^{\dot{\epsilon} t} \tag{44}$$

Un voltaje inicial  $e_1$  es suministrado a través de un potenciómetro acoplado al mecanismo de extensión, pero dado que la longitud es proporcional a la velocidad, o sea, que la longitud deberá crecer exponencialmente con el tiempo.

Una manera de obtener este perfil de velocidad sería mediante el esquema siguiente. (18)

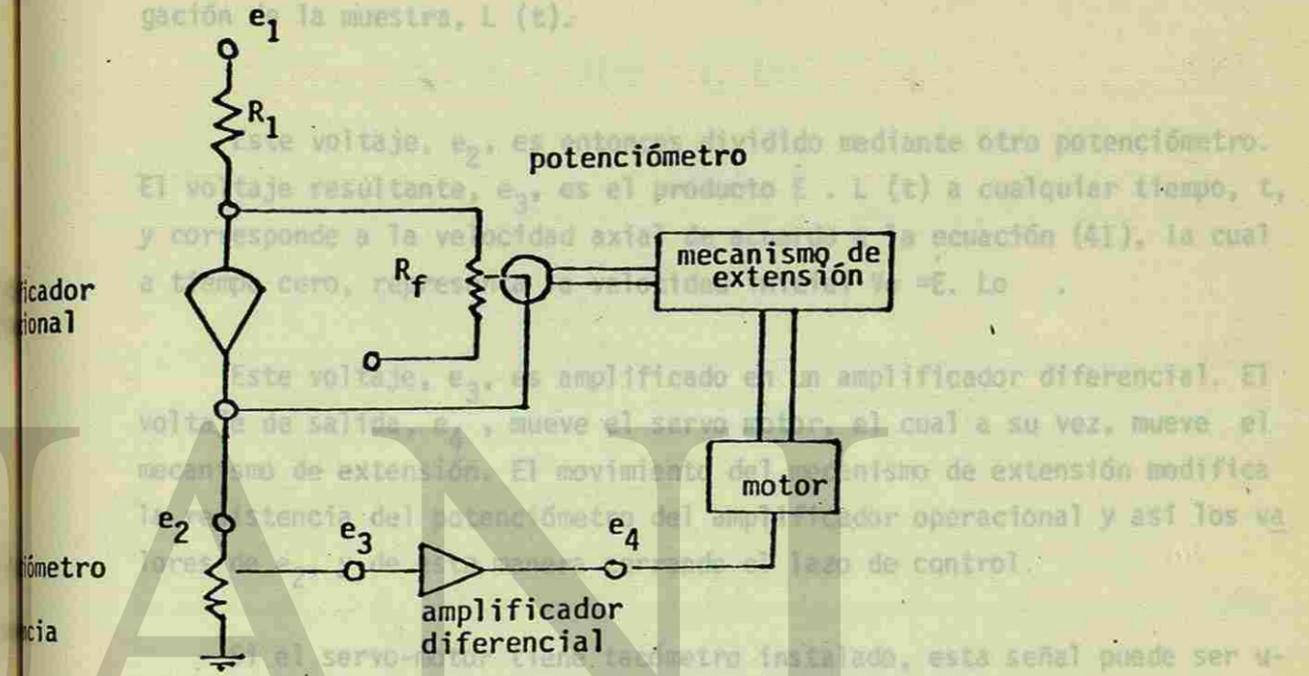
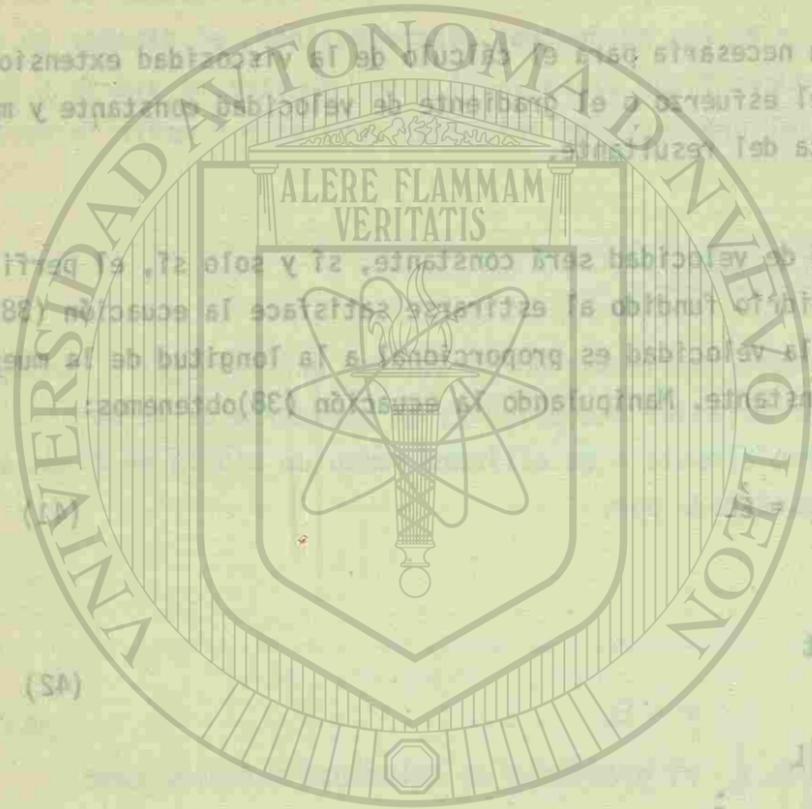


Figura 21. Circuito electrónico para una deformación a gradiente de velocidad constante.

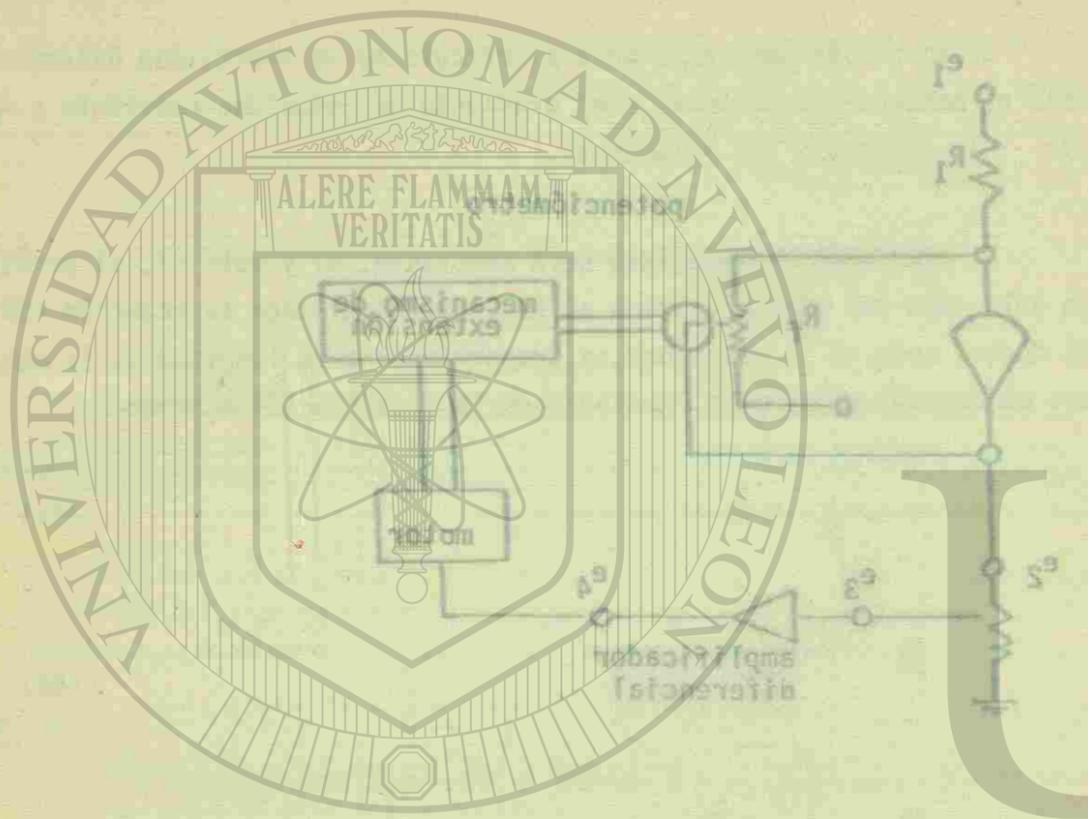
Un voltaje inicial  $e_1$ , es suministrado a través de un potenciómetro acoplado al mecanismo de extensión, pero dado que la salida de un amplificador operacional es proporcional a la resistencia de retroalimentación,

$$e_2 = \left( \frac{R_f}{R_1} \right) e_1 \quad (45)$$



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Una manera de obtener este perfil de velocidad sería mediante el esquema siguiente. (18)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

La finalidad de poder variar los valores del gradiente de velocidad  $\dot{E}$ , es con el propósito de identificar posible comportamiento no newtoniano, dado que si el vidrio fundido es newtoniano, la viscosidad extensional deberá ser independiente del gradiente de velocidad.

(18)

$$e_2 = \left( \frac{R_2}{R_1} \right) e_1$$

La resistencia del potenciómetro es la resistencia de retroalimentación del amplificador operacional. El voltaje resultante  $e_2$  es proporcional a la longitud, y a tiempo cero corresponde a la longitud inicial,  $L_0$ , de la muestra. A cualquier tiempo,  $t$ ,  $e_2(t)$  es proporcional a la elongación de la muestra,  $L(t)$ .

$$A_0 \cdot L_0 = A(t) \cdot L(t) \quad (40)$$

Este voltaje,  $e_2$ , es entonces dividido mediante otro potenciómetro. El voltaje resultante,  $e_3$ , es el producto  $\dot{E} \cdot L(t)$  a cualquier tiempo,  $t$ , y corresponde a la velocidad axial de acuerdo a la ecuación (41), la cual a tiempo cero, representa la velocidad inicial  $V_0 = \dot{E} \cdot L_0$ .

$$A(t) = \frac{A_0 \cdot L_0}{L(t)} \quad (42)$$

Este voltaje,  $e_3$ , es amplificado en un amplificador diferencial. El voltaje de salida,  $e_4$ , mueve el servo motor, el cual a su vez, mueve el mecanismo de extensión. El movimiento del mecanismo de extensión modifica la resistencia del potenciómetro del amplificador operacional y así los valores de  $e_2$ , y de esta manera cerrando el lazo de control.

$$\frac{e_4}{A} = \frac{e_3}{L} \cdot L(t) \quad (43)$$

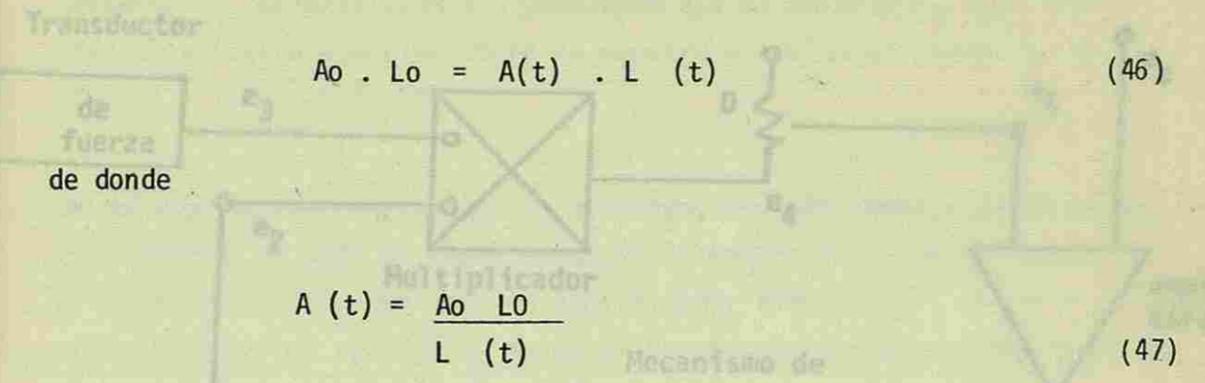
Si el servo-motor tiene tacómetro instalado, esta señal puede ser utilizada a su vez para controlar el lado izquierdo de la ecuación (41) y así obtener un mejor control.

Este procedimiento resultará en una extensión con gradiente de velocidad constante, el cual puede ser fácilmente variado cambiando simplemente el valor del potenciómetro de referencia que nos representa,  $E$ .

Es claro que la viscosidad extensional podrá ser calculada a partir de la

La finalidad de poder variar los valores del gradiente de velocidad  $\dot{E}$ , es con el propósito de identificar posible comportamiento no newtoniano, dado que si el vidrio fundido es newtoniano, la viscosidad extensional deberá ser independiente del gradiente de velocidad.

La respuesta del material a esta deformación será el esfuerzo, el cual podemos medir mediante el empleo de un transductor de fuerza que nos indique la fuerza ejercida sobre la muestra durante su extensión, F (t) , y mediante la ecuación de continuidad.



el esfuerzo quedará expresado como

$$\frac{F(t)}{A(t)} = \frac{F(t) \cdot L(t)}{A_0 \cdot L_0} \quad (48)$$

el valor de L (t) como se mencionó anteriormente puede ser registrado a partir del voltaje e<sub>2</sub> y los valores de A<sub>0</sub> y L<sub>0</sub> , son las dimensiones iniciales de la muestra.

Es claro que la viscosidad extensional podrá ser calculada a partir de la ecuación (41) una vez que el valor del esfuerzo sea constante.

Figura 22. Circuito electrónico para una deformación a velocidad constante. De la misma manera que el caso anterior, el voltaje e<sub>2</sub> nos representará la longitud de la muestra a cualquier tiempo, t, el voltaje e<sub>1</sub> que representa

la resistencia del potenciómetro es la resistencia de retroalimentación del amplificador operacional. El voltaje resultante es proporcional a la longitud, y a tiempo cero corresponde a la longitud inicial, L<sub>0</sub>, de la muestra. A cualquier tiempo, t, e<sub>1</sub> es proporcional a la elongación de la muestra, L (t).

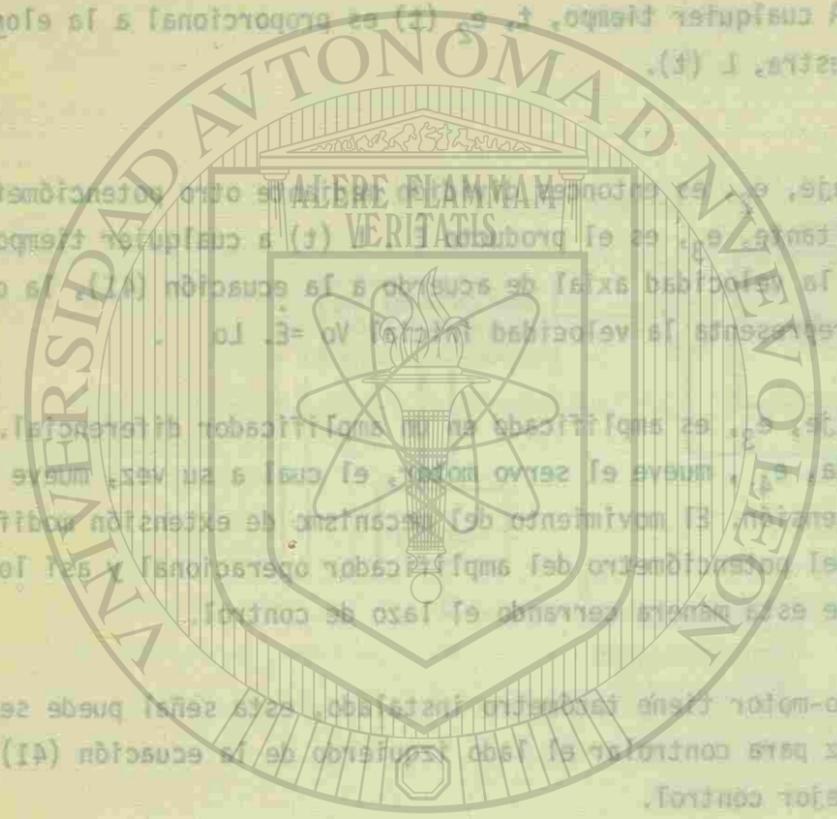
Este voltaje, e<sub>1</sub>, es enviado a un potenciómetro. El voltaje resultante, e<sub>2</sub>, es el producto de e<sub>1</sub> a cualquier tiempo, t, y corresponde a la velocidad axial de acuerdo a la ecuación (41), la cual a tiempo cero, representa la velocidad inicial V<sub>0</sub> = E · L<sub>0</sub>.

Este voltaje, e<sub>2</sub>, es amplificado en un amplificador diferencial. El voltaje de salida, e<sub>3</sub>, mueve el servo motor, el cual a su vez mueve el mecanismo de extensión. El movimiento del mecanismo de extensión modifica la resistencia del potenciómetro del amplificador operacional, y así los voltajes de e<sub>1</sub> y de e<sub>2</sub> se ven afectados por el lazo de control.

Si el servo-motor tiene tachómetro instalado, esta señal puede ser utilizada a su vez para controlar el lazo de retroalimentación (41) y así obtener un mejor control.

Este procedimiento resultará en una extensión con gradiente de velocidad constante, el cual puede ser fácilmente variado cambiando simplemente el valor del potenciómetro de retroalimentación que nos representa E.

La finalidad de poder variar los valores del gradiente de velocidad es con el propósito de facilitar los resultados de los experimentos no newtonianos, dado que si el valor de E es constante, la viscosidad extensional deberá ser independiente del gradiente de velocidad.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La ecuación (40) también nos indica que podemos llevar a cabo una extensión a esfuerzo constante, la cuál puede ser obtenida mediante el circuito siguiente:

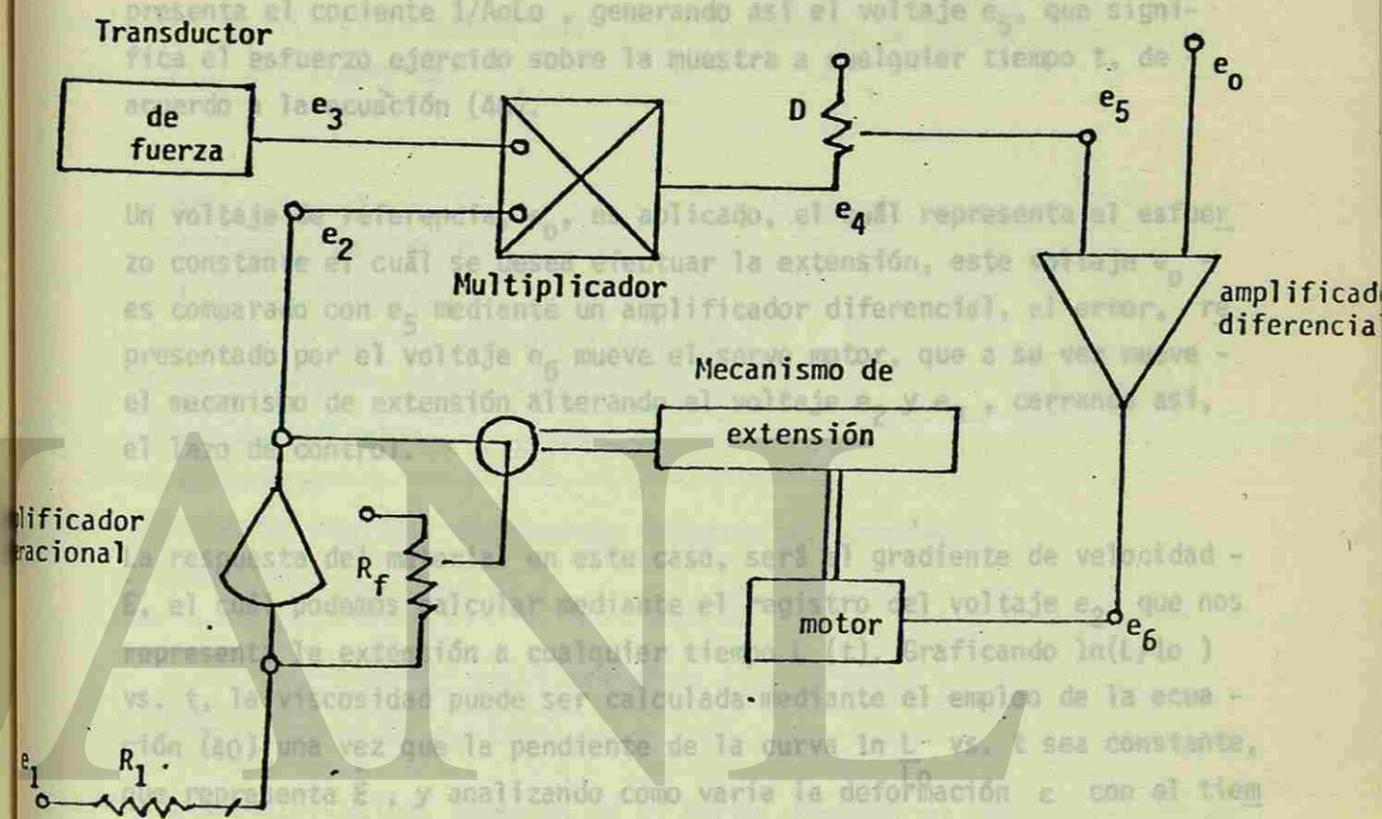
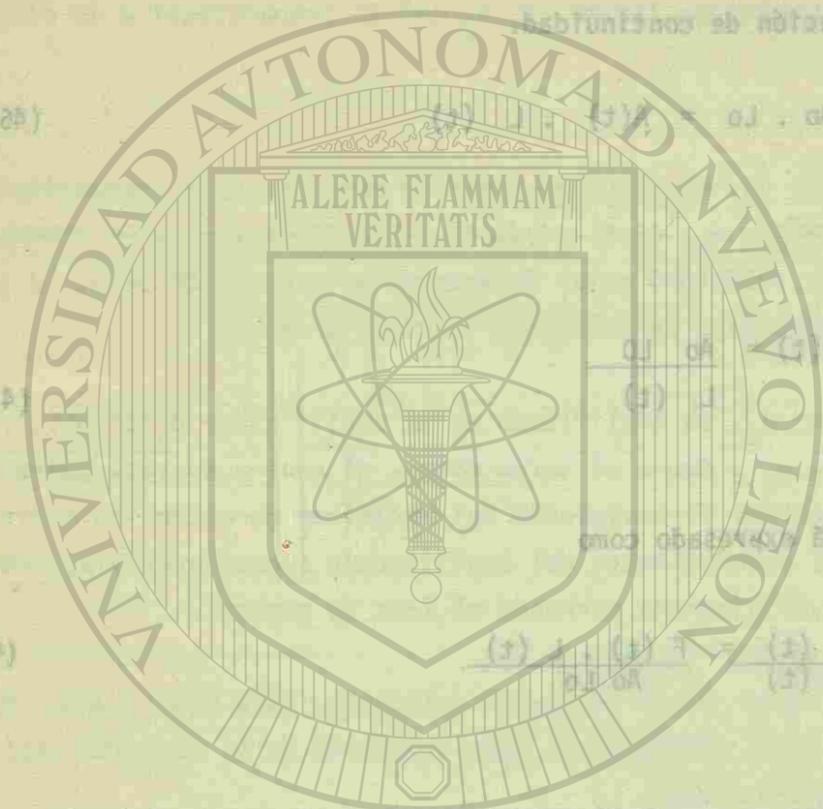


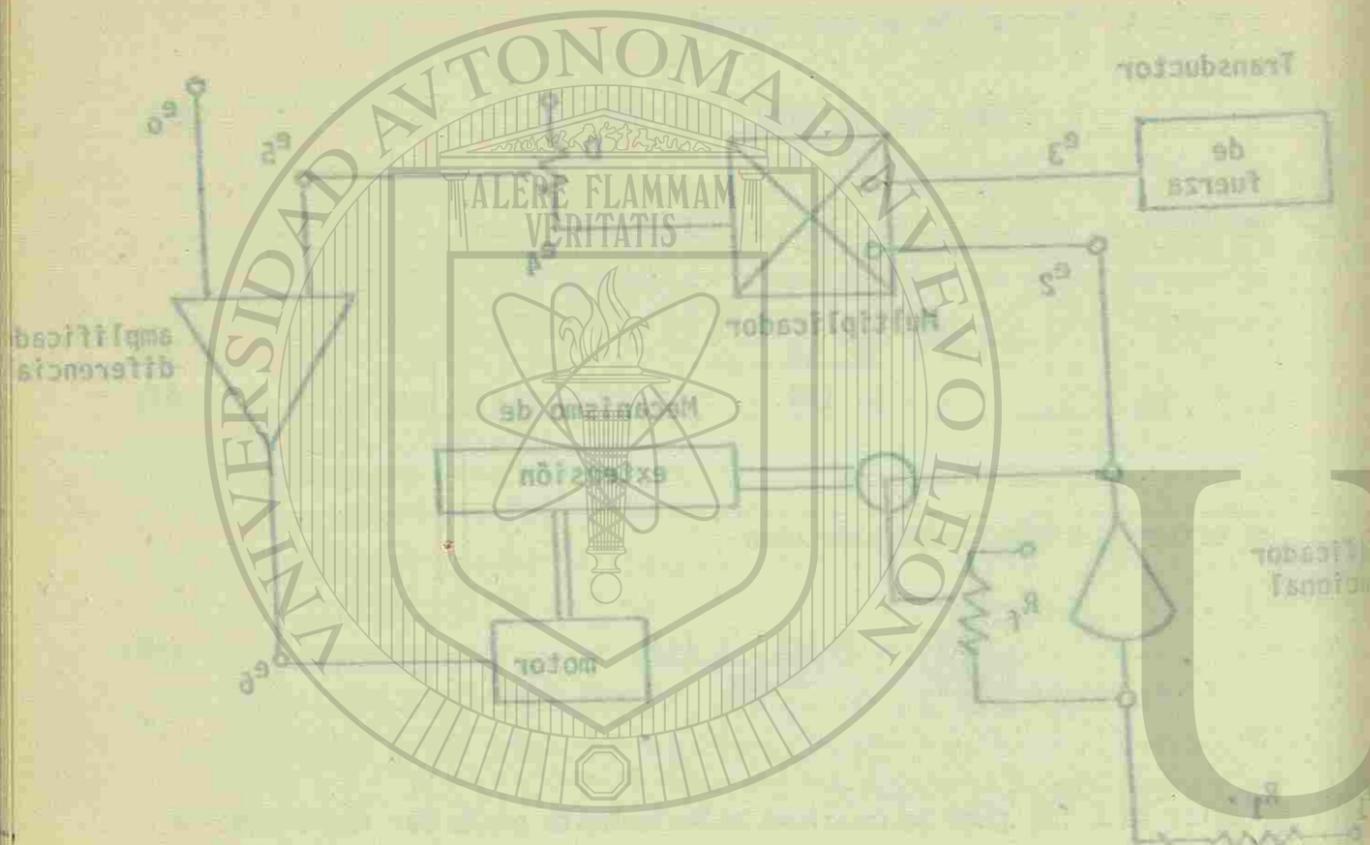
Figura 22. Circuito electrónico para una deformación a esfuerzo constante. De la misma manera que el caso anterior, el voltaje  $e_2$ , nos representa la longitud de la muestra a cualquier tiempo,  $t$ , el voltaje  $e_3$  que representa



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La ecuación (40) también nos indica que podemos llevar a cabo una extensión a esfuerzo constante, la cual puede ser obtenida mediante el circuito siguiente:



b. Selección de equipo.

La fuerza ejercida sobre la muestra es multiplicado por el voltaje  $e_2$ , dado así un voltaje  $e_4$ , que representa el producto  $F(t) \cdot L(t)$ , este voltaje  $e_4$ , es a su vez dividido mediante el potenciómetro D, que representa el cociente  $1/A_0L_0$ , generando así el voltaje  $e_5$ , que significa el esfuerzo ejercido sobre la muestra a cualquier tiempo  $t$ , de acuerdo a la ecuación (48).

Un voltaje de referencia,  $e_0$ , es aplicado, el cuál representa el esfuerzo constante el cuál se desea efectuar la extensión, este voltaje  $e_0$  es comparado con  $e_5$  mediante un amplificador diferencial, el error, representado por el voltaje  $e_6$  mueve el servo motor, que a su vez mueve el mecanismo de extensión alterando el voltaje  $e_2$  y  $e_3$ , cerrando así, el lazo de control.

La respuesta del material en este caso, será el gradiente de velocidad  $\dot{\epsilon}$ , el cuál podemos calcular mediante el registro del voltaje  $e_2$  que nos representa la extensión a cualquier tiempo  $L(t)$ . Graficando  $\ln(L/l_0)$  vs.  $t$ , la viscosidad puede ser calculada mediante el empleo de la ecuación (40) una vez que la pendiente de la curva  $\ln L$  vs.  $t$  sea constante, que representa  $\dot{\epsilon}$ , y analizando como varia la deformación  $\epsilon$  con el tiempo  $t$  se pueden obtener los parámetros del modelo viscoelástico.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



- Horno tubular
- Temperatura de trabajo 200 - 1200°C
- Longitud 22"
- Longitud con perfil de temperatura plano 12" como máximo
- Diámetro interno 3"
- Diámetro externo ?
- Control de temperatura con error de  $\pm 1^\circ\text{C}$

Figura 22. Circuito electrónico para una deformación a esfuerzo constante. De la misma manera que el caso anterior, el voltaje  $e_2$  nos representa la longitud de la muestra a cualquier tiempo  $t$ , el voltaje  $e_3$  que representa

### b.- Selección de equipo.

Como se puede apreciar en la Fig.23 el equipo necesario para construir un extensiómetro del cual se pueda obtener información experimental para calcular la viscosidad extensional y los parámetros de comportamiento viscoelástico del vidrio es:

- Horno
- Transductor de fuerza
- Circuitos analógicos
- Servo Motor con transmisión y Tacómetro
- Potenciómetro, mecanismo de freno y clutch
- Servo amplificador
- Graficadores
- Termómetro digital, termopares, Selector de Termopares
- Accesorios.

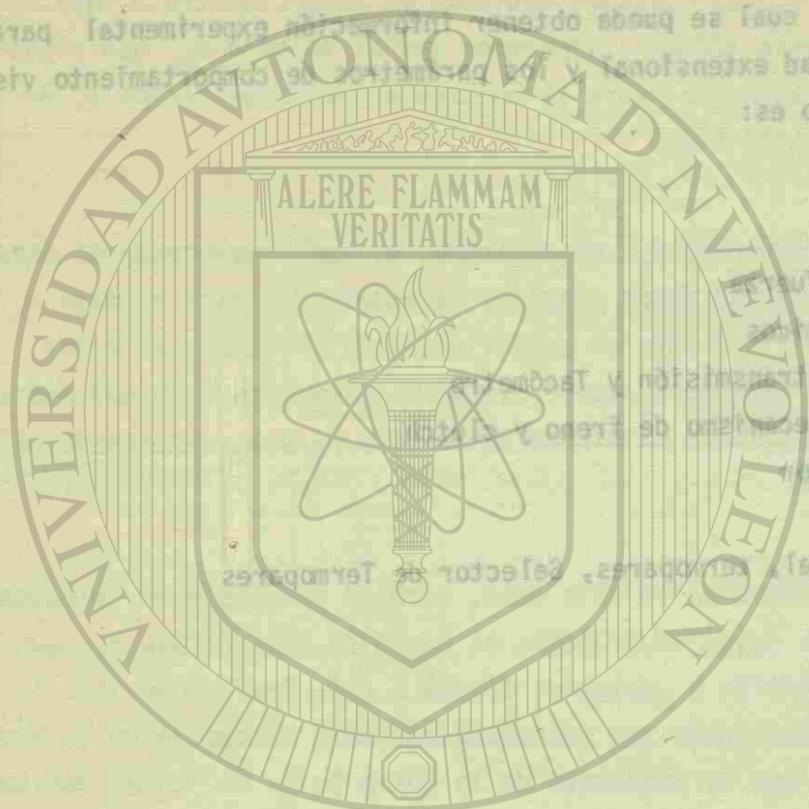
#### Horno

Las características deseadas en el horno, tomando en cuenta las temperaturas de trabajo para las determinaciones por realizar en los diferentes vidrios que hay en el mercado, (tabla 9) y los accesorios que llevaría en la parte interna con el objeto de hacer la extensión son:

- Horno tubular
- Temperatura de trabajo 200 - 1200°C
- Longitud 24"
- Longitud con perfil de temperatura plano 12" como mínimo.
- Diámetro interno 3"
- Diámetro externo ?
- Control de temperatura con error de  $\pm 1^\circ\text{C}$

Selección de equipo.

Como se puede apreciar en la Fig. 23 el equipo necesario para construir un extensómetro del cual se pueda obtener información experimental para calcular la viscosidad extensional y la dependencia del comportamiento viscoelástico del vidrio es:



- Horno
- Transductor de fuerza
- Circuitos analógicos
- Servo Motor con transmisión y Tachómetro, mecanismo de freno y Servo amplificador
- Gráficas
- Termómetro digital, potenciómetros, selector de Termopares
- Accesorios.

Horno

Las características deseadas en el horno, tomando en cuenta las temperaturas de trabajo para las determinaciones por realizar en los diferentes vidrios que hay en el mercado, (Tabla 9) y los accesorios que favorezcan en la construcción del extensómetro son:

- Horno tubular
- Temperatura de trabajo 500 / 1200°C
- Longitud con perfil de temperatura plano 12" como mínimo.
- Diámetro interno 3"
- Diámetro externo 4"
- Control de temperatura con error de  $\pm 1^\circ\text{C}$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

se obtiene lo siguiente, tabla 15, 16, y del modelo mecánico de cuatro par...

- Termopares distribuidos a lo largo del horno con el propósito de detectar algún perfil de temperatura.
- Un termopar calibrado con traductor digital de temperatura localizado en el mecanismo de extensión para determinar exactamente la temperatura de la muestra.

En una primera instancia se trató de construir el horno, sin embargo en algunas visitas a posibles constructores de hornos se llegó a la conclusión que la mejor opción era comprarlo construido. Con este fin se hizo una consulta de catálogos de fabricantes, encontrándose que MELLE COMPANY, INC. tenía los hornos con mayor aproximación a lo deseado y con mejor precisión y resolución en el control de temperatura. Se anexa las características y cotización del horno y equipo de control, Anexo B.

Transductor de Fuerza.

Para determinar el rango de fuerzas, se procedió a fijar algunas variables y analizar algunos modelos.

- muestra: Cilindro de 1 a 6 cm. de longitud  
Diámetro 0.2 - 1.0cm  
longitud máxima después de la extensión 30 cm.
- rango de gradiente de velocidad  $\dot{\epsilon} = 0.1 \rightarrow 0.01 \text{ seg}^{-1}$

Los modelos analizados fueron el de Newton utilizando la viscosidad extensional Ec. 6, y el propuesto por Merle y Truchason.

Del análisis del modelo de Newton de acuerdo con las Ecuaciones 6,7,8,

se obtiene lo siguiente, tabla 15,16, y del modelo mecánico de cuatro parámetros propuesto por Merle y Truchasson, probado con los valores reportados por ellos se obtuvo lo siguiente, tabla 17.

Los resultados obtenidos de estos modelos nos hizo tomar la conclusión de seleccionar un transductor de fuerza con un rango de 0 —1 Kg<sub>f</sub> , con el propósito de hacer las primeras pruebas y variando la temperatura, trabajar en el rango antes mencionado. Una vez que se hagan las pruebas se tendrá más conocimiento del comportamiento reológico del vidrio y podremos hacer una selección mas apropiada para el rango de temperaturas que nos interesa estudiar.

El funcionamiento, características del transductor de fuerza y accesorios seleccionados se puede ver en anexo B.

t (seg)	L(t) (cm)	F(t) (gr <sub>f</sub> )
0	1.00	960.24
5	1.00	960.24
10	1.00	960.24
15	1.00	960.24
20	1.00	960.24
25	1.00	960.24
30	1.00	960.24
35	1.00	960.24
40	1.00	960.24
45	1.00	960.24
50	1.00	960.24
55	1.00	960.24
60	1.00	960.24
65	1.00	960.24
70	1.00	960.24
75	1.00	960.24
80	1.00	960.24
85	1.00	960.24
90	1.00	960.24
95	1.00	960.24
100	1.00	960.24
105	1.00	960.24
110	1.00	960.24
115	1.00	960.24
120	1.00	960.24
125	1.00	960.24
130	1.00	960.24
135	1.00	960.24
140	1.00	960.24
145	1.00	960.24
150	1.00	960.24
155	1.00	960.24
160	1.00	960.24
165	1.00	960.24
170	1.00	960.24
175	1.00	960.24
180	1.00	960.24
185	1.00	960.24
190	1.00	960.24
195	1.00	960.24
200	1.00	960.24
205	1.00	960.24
210	1.00	960.24
215	1.00	960.24
220	1.00	960.24
225	1.00	960.24
230	1.00	960.24
235	1.00	960.24
240	1.00	960.24
245	1.00	960.24
250	1.00	960.24
255	1.00	960.24
260	1.00	960.24
265	1.00	960.24
270	1.00	960.24
275	1.00	960.24
280	1.00	960.24
285	1.00	960.24
290	1.00	960.24
295	1.00	960.24
300	1.00	960.24
305	1.00	960.24
310	1.00	960.24
315	1.00	960.24
320	1.00	960.24
325	1.00	960.24
330	1.00	960.24
335	1.00	960.24
340	1.00	960.24
345	1.00	960.24
350	1.00	960.24
355	1.00	960.24
360	1.00	960.24
365	1.00	960.24
370	1.00	960.24
375	1.00	960.24
380	1.00	960.24
385	1.00	960.24
390	1.00	960.24
395	1.00	960.24
400	1.00	960.24
405	1.00	960.24
410	1.00	960.24
415	1.00	960.24
420	1.00	960.24
425	1.00	960.24
430	1.00	960.24
435	1.00	960.24
440	1.00	960.24
445	1.00	960.24
450	1.00	960.24
455	1.00	960.24
460	1.00	960.24
465	1.00	960.24
470	1.00	960.24
475	1.00	960.24
480	1.00	960.24
485	1.00	960.24
490	1.00	960.24
495	1.00	960.24
500	1.00	960.24



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Tabla 15. Comportamiento de las variables del proceso de extensión a gradiente de velocidad constante, en el modelo de newton.

$$D_0 = 0.2 \text{ cm} \quad \dot{\epsilon} = 0.1 \text{ seg}^{-1}$$

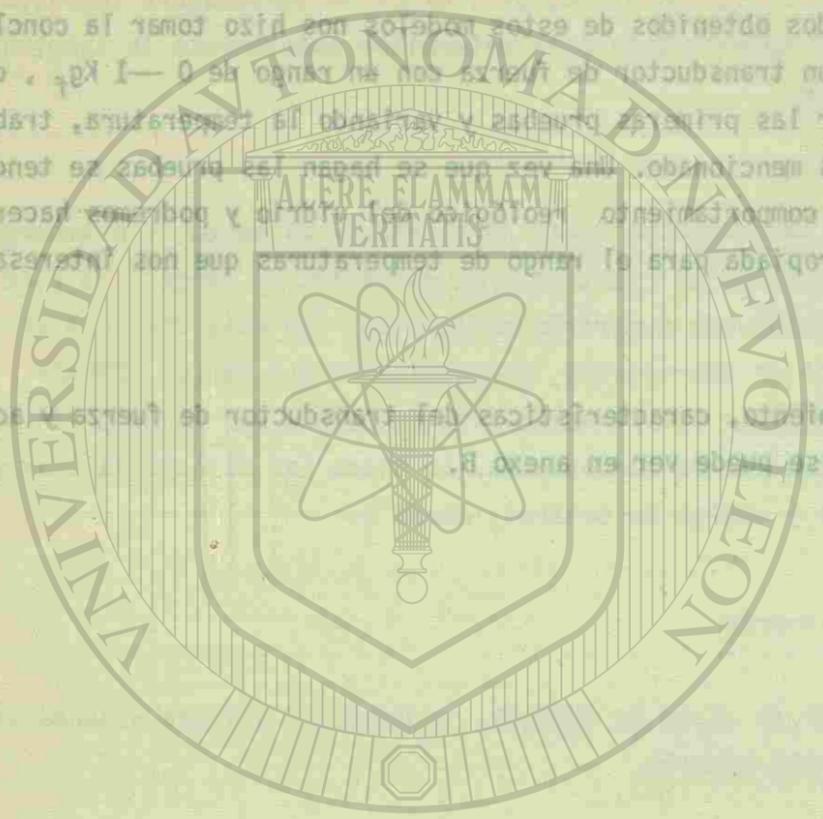
$$L_0 = 1 \text{ cm} \quad \eta = 3 \cdot 10^8 \text{ poise}$$

t (seg)	L(t) (cm)	F(t) (gr <sub>f</sub> )
0	1	960.24
5	1.64	584.09
10	2.71	354.12
15	4.48	214.06
20	7.38	128.44
25	12.18	78.83
30	20.08	47.82
34	30.00	32.00

$$D_0 = 0.2 \text{ cm} \quad \dot{\epsilon} = 0.01 \text{ seg}^{-1}$$

$$L_0 = 1 \text{ cm} \quad \eta = 3 \cdot 10^8$$

t (seg)	L(t) (cm)	F(t) (gr <sub>f</sub> )
0	1.0	96.02
20	1.22	78.59
60	1.82	52.59
100	2.71	35.43
200	7.38	12.99
300	20.08	4.78
334	30.00	3.2



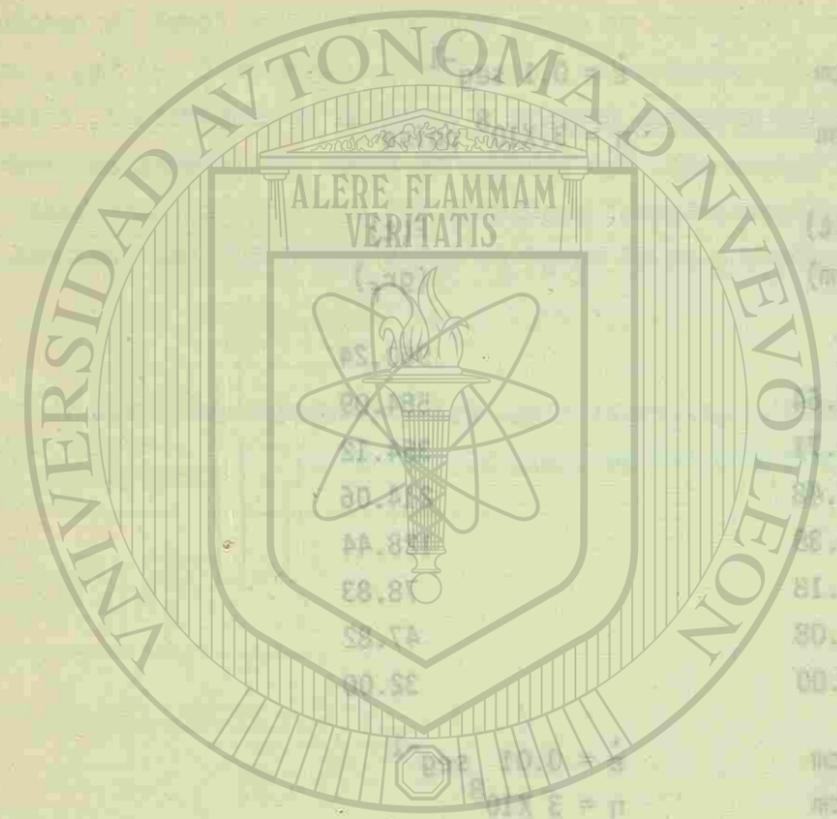
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Tabla 16.- Comportamiento de las variables del proceso de extensión a esfuerzo constante, en el modelo de Newton.



t (seg)	$\dot{\epsilon}$ (seg <sup>-1</sup> )	(poises)
$20.72 \times 10^7$	$1.11 \times 10^{-8}$	$9 \times 10^{14}$
$6.9 \times 10^5$	$3.33 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{12}$
$6.9 \times 10^3$	$3.33 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{10}$
690.8	$3.33 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^9$
69.08	$3.33 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^8$
0.69	3.33	$3 \times 10^6$

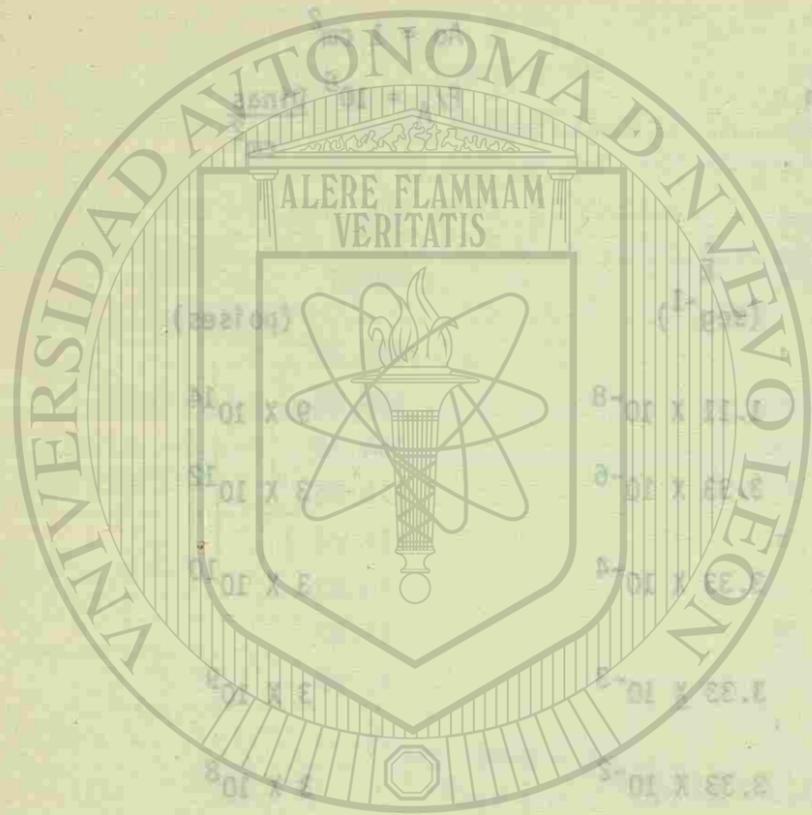


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

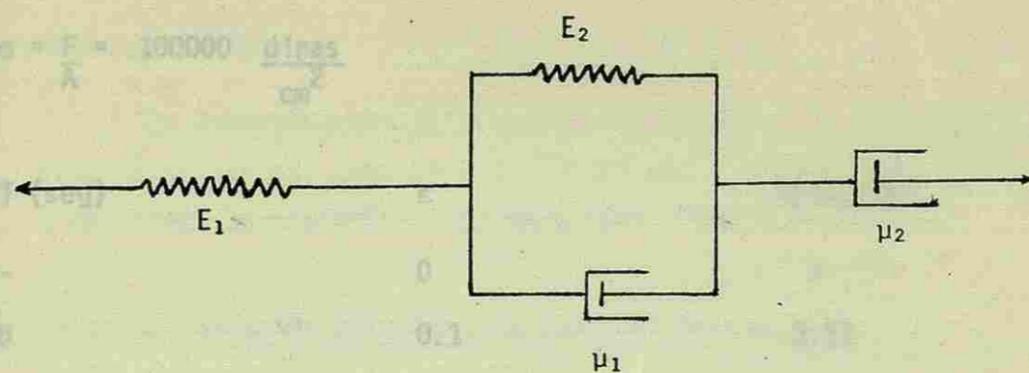


Tabla 16.- Comportamiento de las variables del proceso de extensión a esfuerzo constante, en el modelo de Newton.



$L_0 = 3 \text{ cm}$   
 $L = 30 \text{ cm}$

Tabla 17.- Análisis del modelo de Merle y Truchasson.



$$\epsilon = \frac{\sigma_0 t}{q_1} + \frac{\sigma_0 (p_1 q_1 - q_2)}{q_1^2} (1 - e^{-\lambda t}) + \frac{\sigma_0 p_2}{q_2} e^{-\lambda t}$$

$$q_1 = \mu_2 = 16000 \frac{\text{gr}}{\text{cm seg}}$$

$$T = 764^\circ\text{C}$$

$$E_1 = 10^6 \frac{\text{gr}}{\text{cm seg}^2}$$

$$q_2 = \frac{\mu_2 \mu_1}{E_2} = 1.6 \times 10^5 \frac{\text{gr}}{\text{cm}}$$

$$E_2 = 10^6 \frac{\text{gr}}{\text{cm seg}^2}$$

$$p_2 = \frac{\mu_1 \mu_2}{E_1 E_2} = 0.16 \text{ seg}^2$$

$$\mu_1 = 10^7 \frac{\text{gr}}{\text{cm seg}}$$

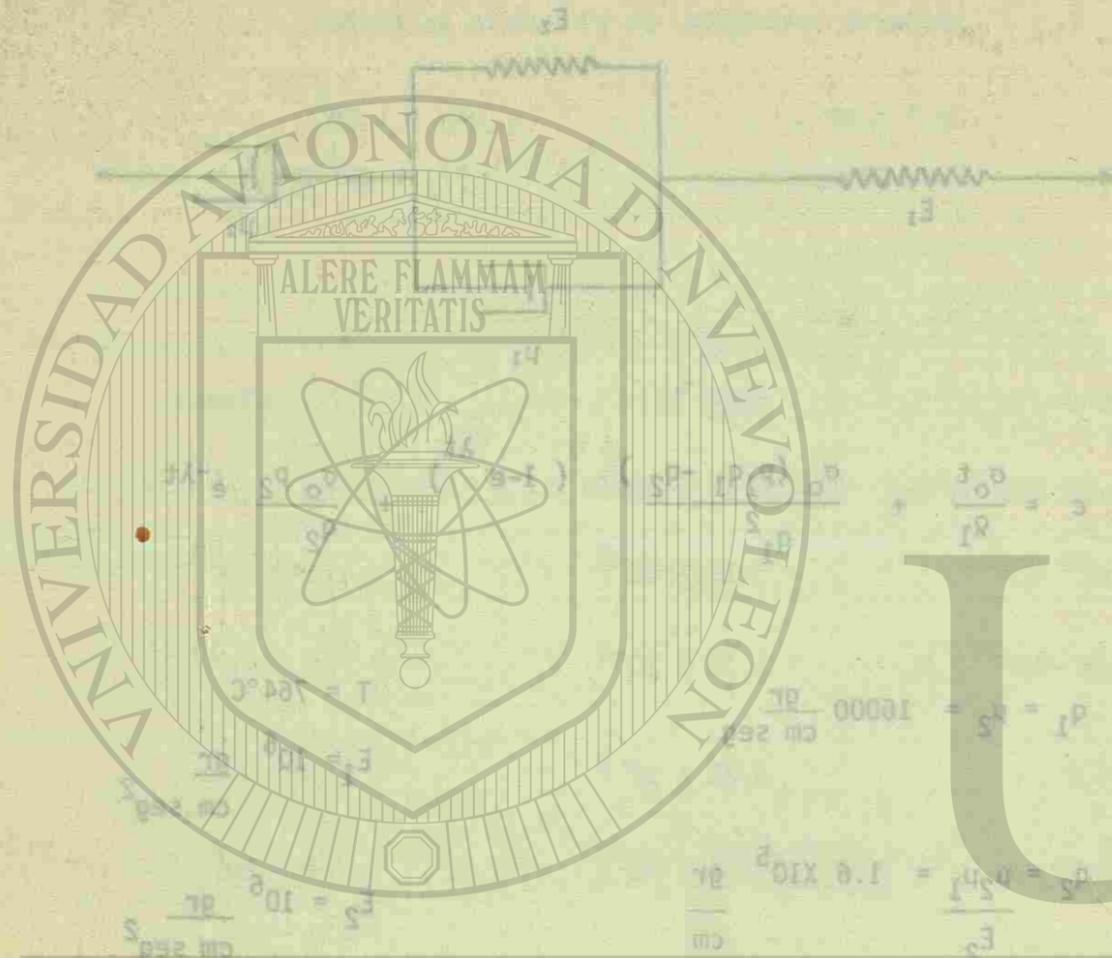
$$p_1 = \frac{\mu_2 E_2 + E_1 \mu_2 + \mu_1 E_1}{E_1 E_2} = 10.032 \text{ seg}$$

$$\mu_2 = 16000 \frac{\text{gr}}{\text{cm seg}}$$

$$L_0 = 3 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{q_1}{q_2} = 0.1 \text{ seg}^{-1}$$

Tabla IV - Análisis del modelo de Marie y Truchasson



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

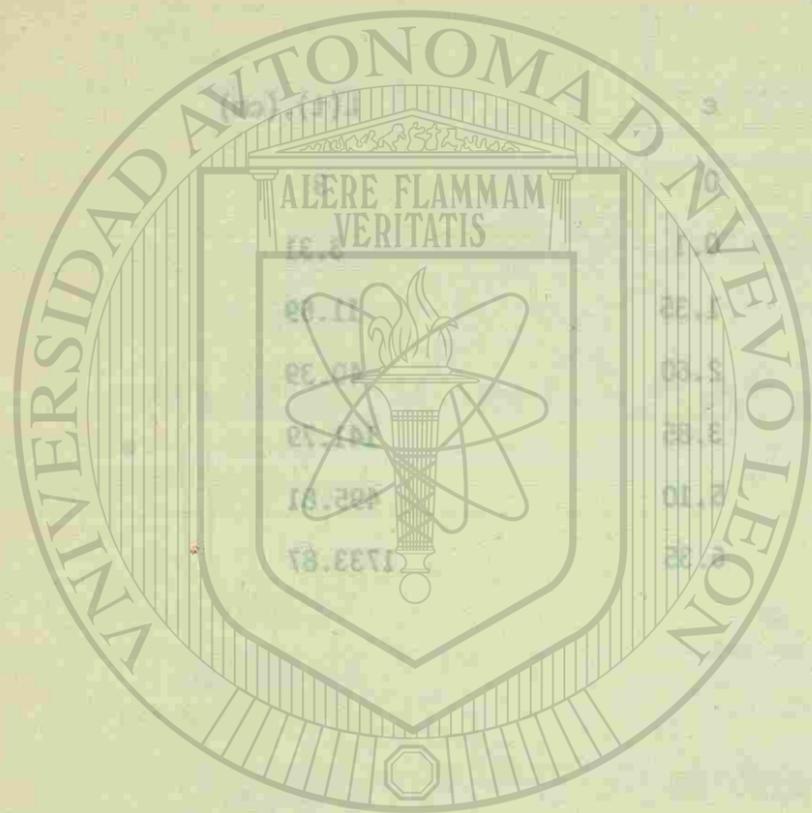
Continuación

$$\sigma = \frac{F}{A} = 100000 \frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2}$$

La determinación del rango de velocidades se hizo fijando algunas variables, como  $\epsilon = 0.1$   $0.01 \text{ seg}^{-1}$ , y  $L = 30 \text{ cm}$ , y aplicando la Ecuación (38), se obtiene lo siguiente:

T (seg)	$\epsilon$	L(t), (cm)
-	0	3
0	0.1	3.31
0.2	1.35	11.59
0.4	2.60	40.39
0.6	3.85	141.79
0.8	5.10	495.81
1.0	6.35	1733.87

Las características del motor seleccionado se pueden ver en 



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Motor-Generador

La determinación del rango de velocidades se hizo fijando algunas variables, como  $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ } 0.01 \text{ seg}^{-1}$ , y  $L_0 = \frac{1}{2} \text{ cm}$ ,  $L=30 \text{ cm}$ , y aplicando la Ecuación (38), se obtiene lo siguiente.

Tala 18, Rango de velocidad del motor y Torque.

$\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ seg}^{-1}$        $V_{\text{máx}} = 27.55 \text{ rpm}$   
     $V_{\text{min}} = 0.7519 \text{ rpm}$

$\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ seg}^{-1}$        $V_{\text{máx}} = 2.25 \text{ rpm}$   
     $V_{\text{min}} = 0.0751 \text{ rpm}$

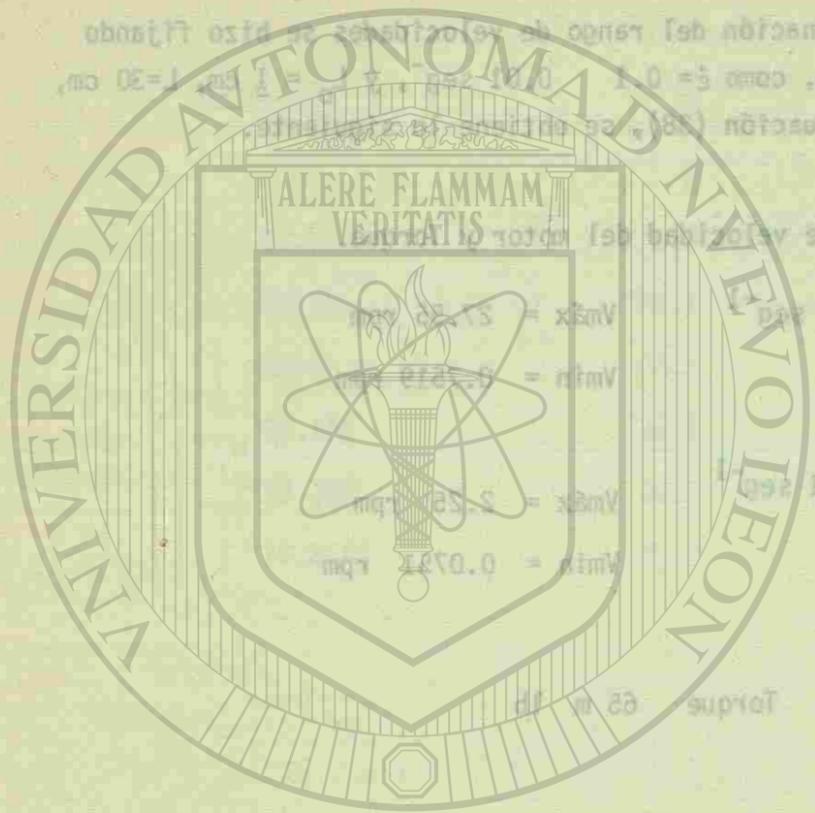
Torque 65 m 1b

Las características del motor seleccionado se pueden ver en

Anexo B.

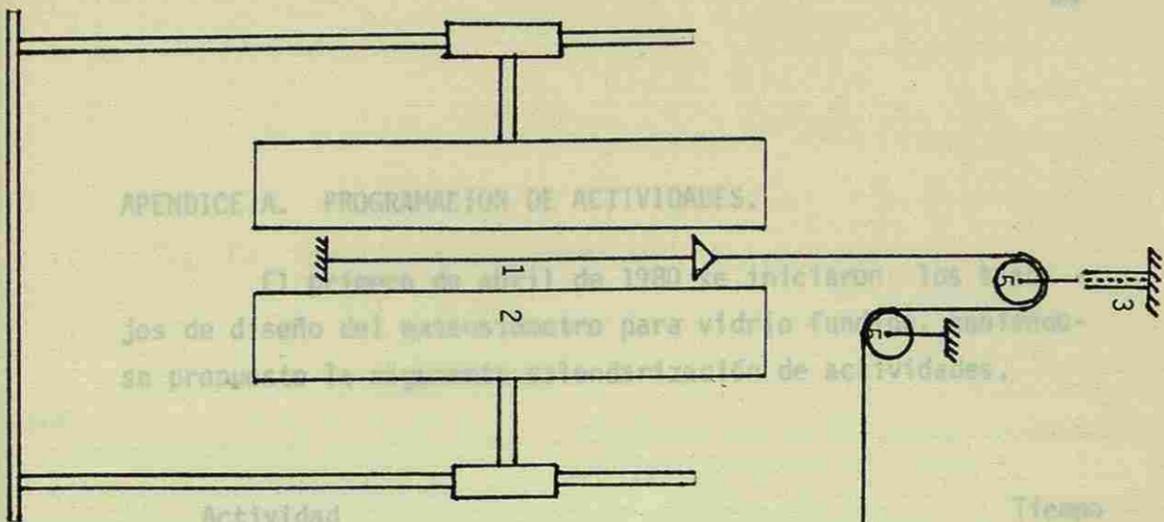


- 1 Fibra de vidrio
- 2 Motor-Generador, 1000 rpm
- 3 Palanca
- 4 Condensador de señal
- 5 Controlador de fuerza
- 6 Controlador de temperatura del motor
- 7 Controlador de velocidad del motor
- 8 Controlador de control
- 9 Controlador de fuerza



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECA



Actividad	Tiempo
1. Recopilación bibliográfica	2 meses
2. Diseño del horno	1 mes
3. Selección de equipo y materiales de construcción	5 meses
4. Diseño de mecánica de control y electrónica de potencia	4 meses
5. Tiempo de espera de materiales	6 meses
6. Pruebas experimentales	1 mes
7. Recepción de materiales	2 meses
8. Experimentación	Permanente
9. Estación de trabajo	Continuo

- 1 fibra de vidrio
- 2 horno
- 3 transductor de fuerza
- 4 motor-generator, trans misión.
- 5 poleas
- 6 acondicionador de señal
- 7 del transductor de fuerza
- 8 control de temperatura del horno
- 9 control electrónico de velocidad del motor
- 10 graficador
- 10 gabinete de control

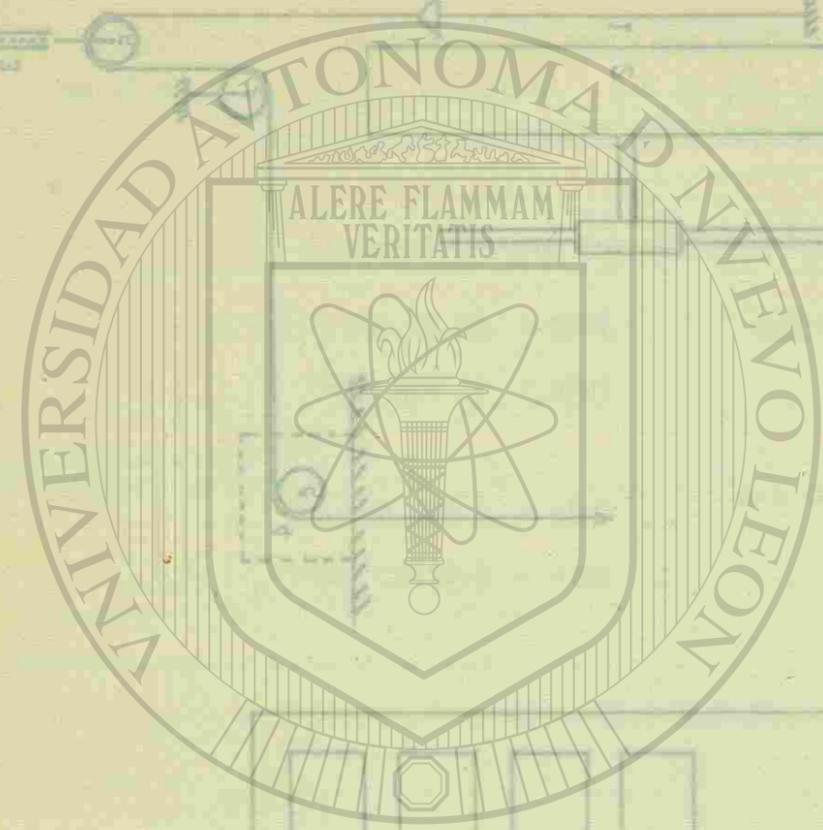
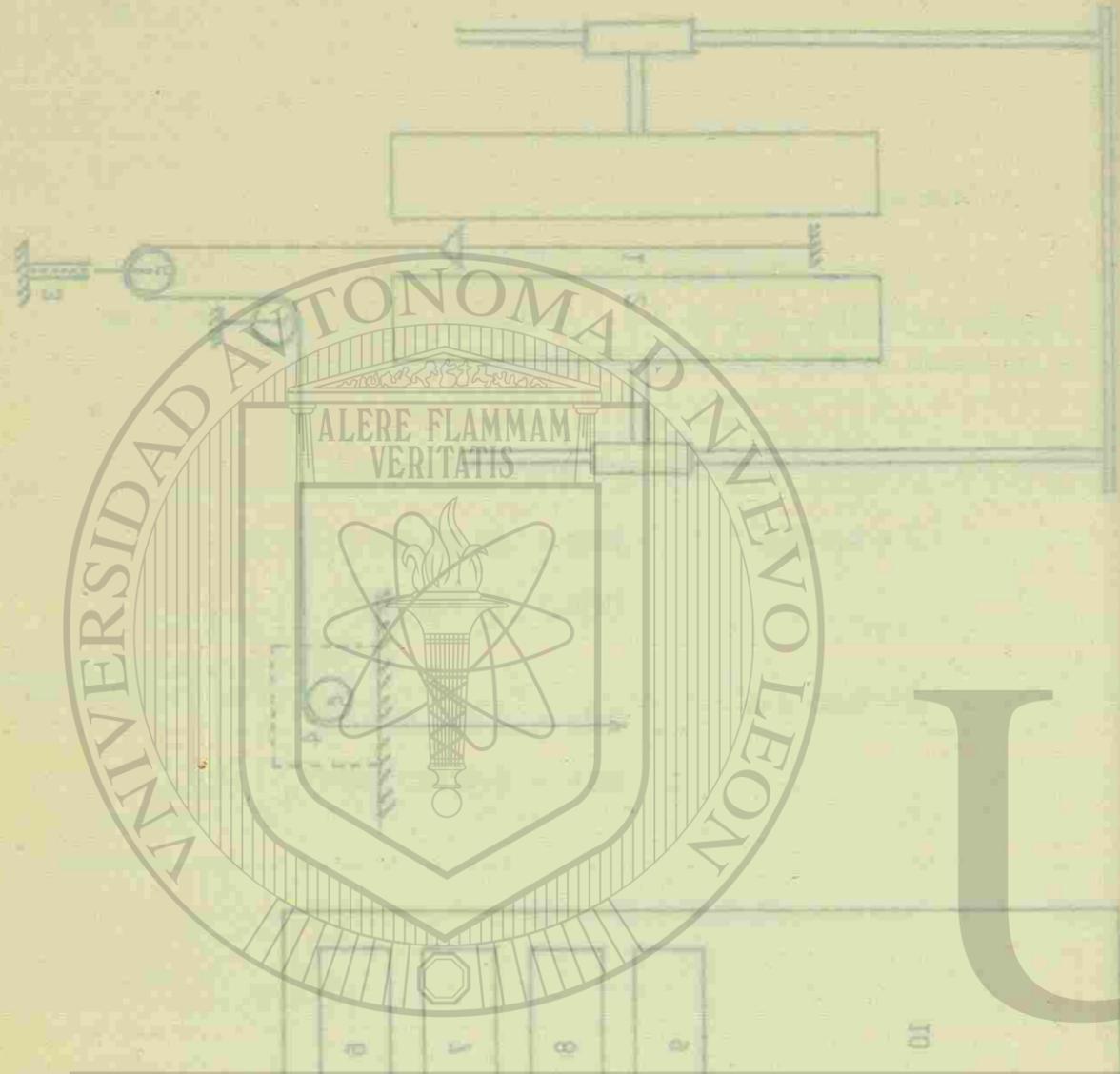
APENDICE A. PROGRAMACION DE ACTIVIDADES.

Fig. 24 GRAFICA DE CALENDARIZACION

El primero de abril de 1980 se iniciaron los trabajos de diseño del extensiómetro para vidrio fundido, habiéndose propuesto la siguiente calendarización de actividades.

Actividad	Tiempo
1. Recopilación bibliográfica	2 meses
2. Diseño del horno	1 mes
3. Selección de equipo y materiales de construcción	5 meses
4. Diseño de mecanismo de extensión y soportería	4 meses
5. Tiempo de espera de equipo y material seleccionado.	6 meses
6. Maquinado y ensamble	6 meses
7. Pruebas experimentales iniciales	1 mes
8. Correcciones pertinentes	2 meses
9. Experimentación	Permanente
10. Estudio de Reología y áreas afines al proyecto	Continuo

La Fig. 24 muestra la distribución de las actividades propuestas.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

- 1. Línea de vidrio
- 2. Horno
- 3. Transductor de fuerza
- 4. Motor-Generador, fuente
- 5. Motor
- 6. Transductor de señal
- 7. Transductor de fuerza
- 8. Control electrónico de velocidad
- 9. Control del motor
- 10. Mecanismo de control

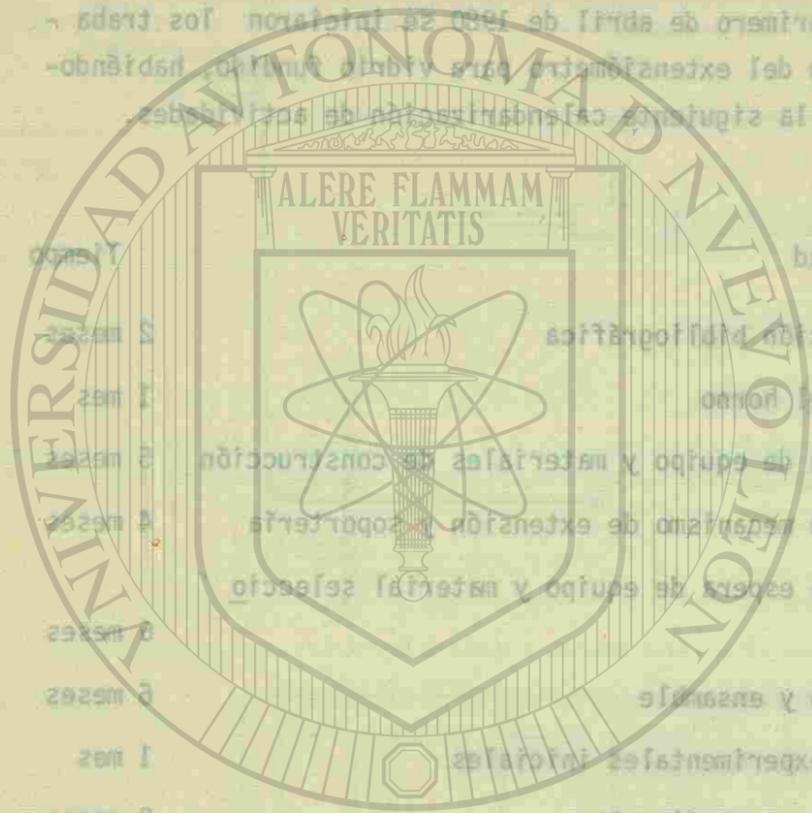
DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS



APÉNDICE A. PROGRAMACIÓN DE ACTIVIDADES

El primero de abril de 1980 se iniciaron los trabajos de diseño del extensómetro para vidrio fundido habiéndose propuesto la siguiente calendarización de actividades:

Actividad	Duración
1. Recopilación bibliográfica	2 meses
2. Diseño del horno	1 mes
3. Selección de equipo y materiales de construcción	3 meses
4. Diseño de redamiento de extensión y soporte	4 meses
5. Tiempo de espera de equipo y material seleccionado	6 meses
6. Madurado y ensamble	6 meses
7. Pruebas experimentales iniciales	1 mes
8. Correcciones pertinentes	2 meses
9. Experimentación	Permanente
10. Estudio de reología y áreas afines al proyecto	Continuo



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La Fig. 24 muestra la distribución de las actividades propuestas.

Fig. 24 GRAFICA DE CALENDARIZACION

Curso de diseño y construcción de un extensómetro para vidrio fundido, iniciado el primero de abril de 1980.

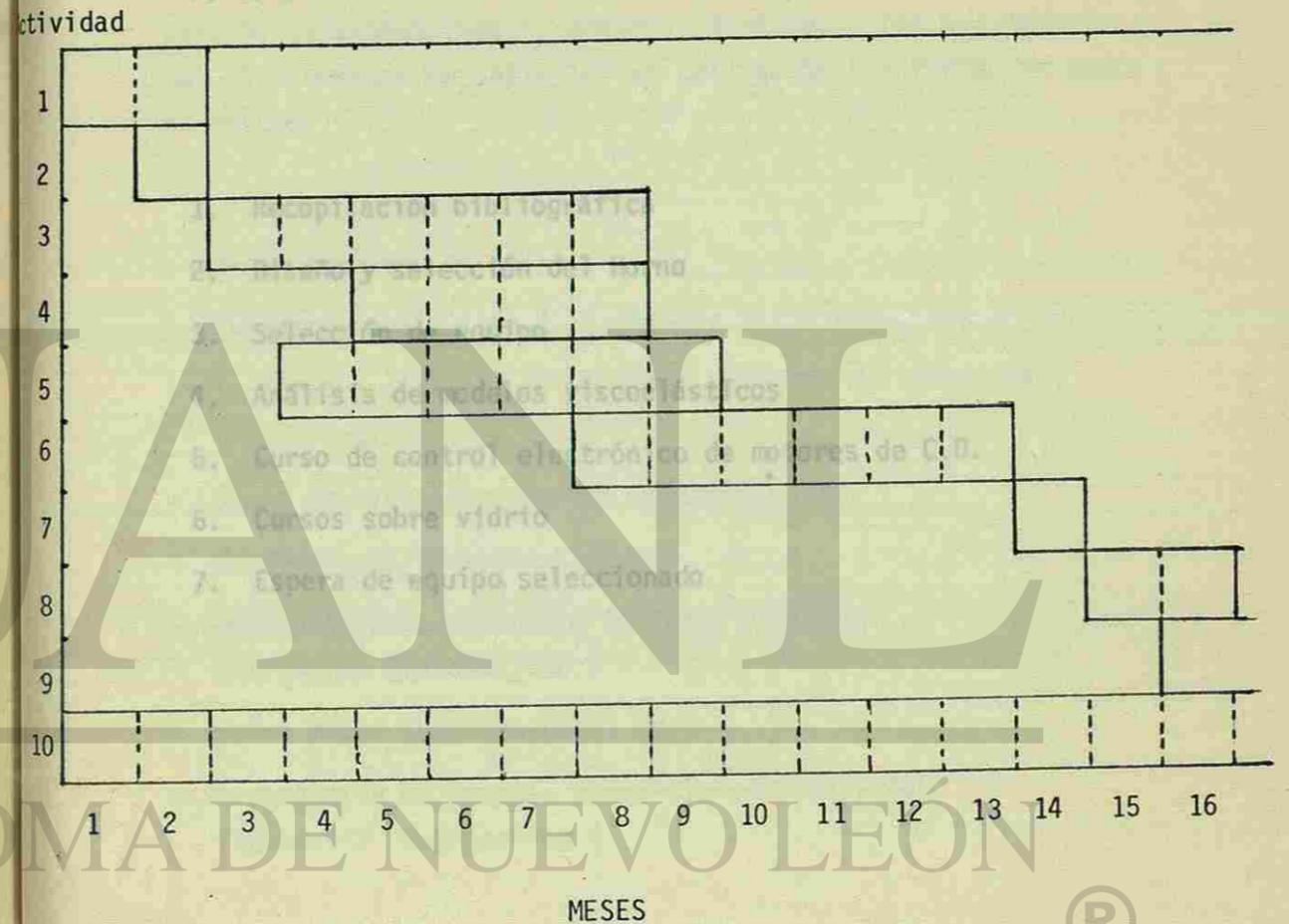
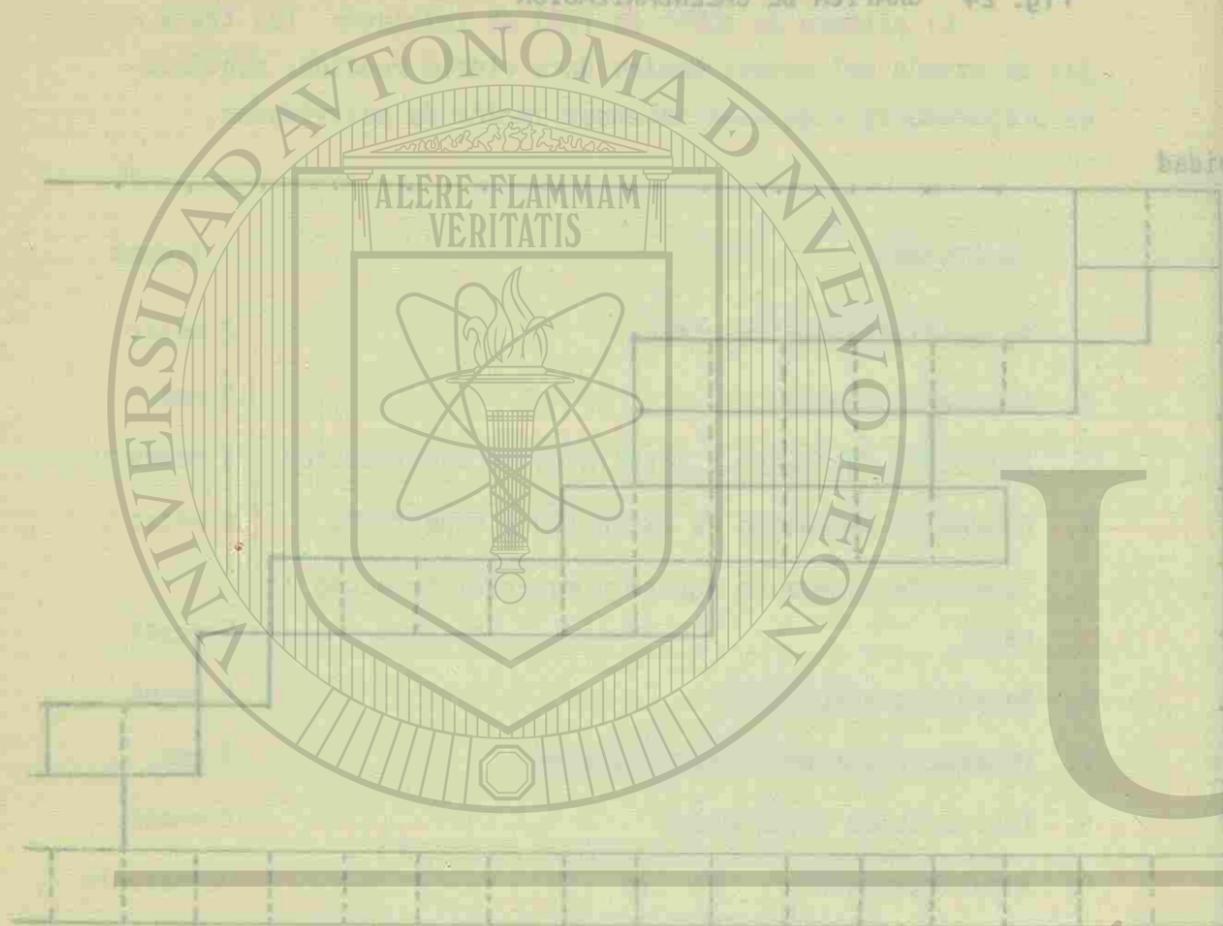


Fig. 24 GRAFICA DE CALENDARIZACION



#### APENDICE B. CARACTERISTICAS Y COTIZACIONES DE EQUIPO.

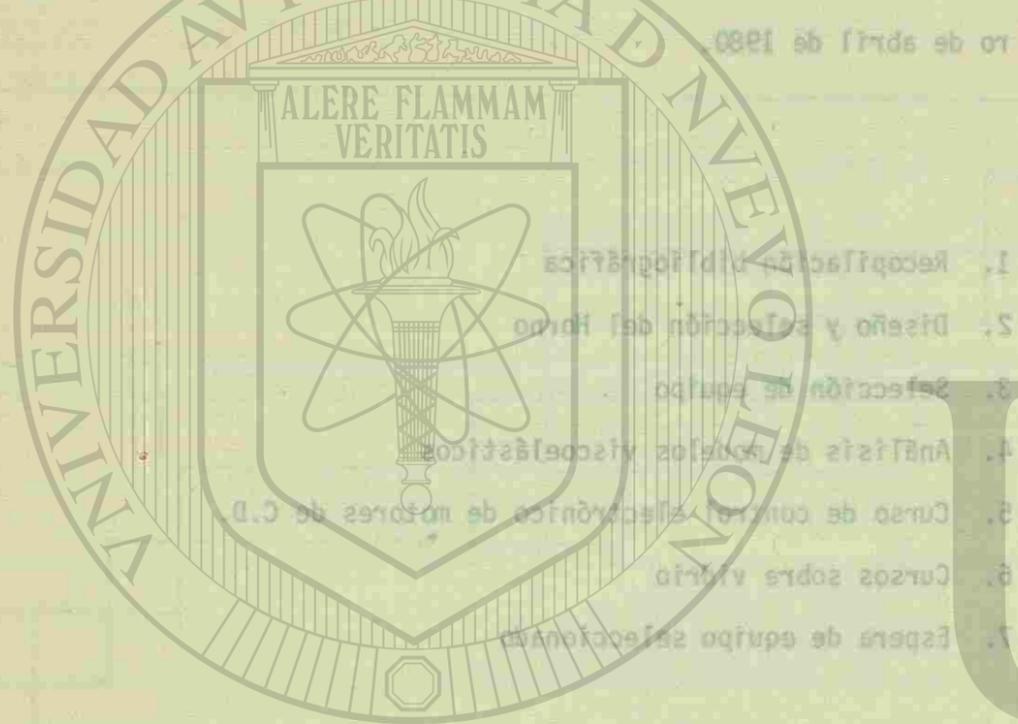
Actividades desarrolladas en el proyecto de diseño y construcción de un extensiómetro para vidrio fundido, iniciado el primer día de abril de 1980. Las características son reunidas en las cartas y copias de catálogos (que se anexan), enviadas a los proveedores con el propósito de solicitarles cotización e información sobre el equipo.

1. Recopilación bibliográfica
2. Diseño y selección del Horno
3. Selección de equipo (Electronic Associates, Inc.)
4. Análisis de modelos viscoelásticos (Servo Motor de termopares, (Electronic Associates, Inc.))
5. Curso de control electrónico de motores de C.D. (Servo Motor de termopares, (Electronic Associates, Inc.))
6. Cursos sobre vidrio
7. Espera de equipo seleccionado
  - Potenciómetro, mecanismo de freno y clutch (AST/Servo Systems, Inc.)
  - Servo Motor (Electro-Graft Co.)

Transductor de fuerza, acondicionador de señal (Schaeffler Engineering, Inc.)

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Actividades desarrolladas en el proyecto de diseño y construc-  
ción de un extensómetro para medir el primer



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

APENDICE C. MODELOS PARA FLUIDOS NO NEWTONIANOS.

a) Modelo de Bingham.

APENDICE B. CARACTERISTICAS Y COTIZACIONES DE EQUIPO.

de dos parámetros, se denomina "plástico de Bingham".

A continuación se presenta una lista del equipo seleccionado cuyas características son resumidas en las cartas y copias de catálogos (que se anexan), enviadas a los proveedores con el propósito de solicitarles cotización e información sobre el equipo.

- Horno (Mellen Co. Inc.)
- Circuitos analógicos ( Electronic Associates, Inc.)
- Termómetro digital, termopares, selector de termopares, (Omega Engineering, Inc.)
- Servo Amplificador (Jordan Controls, Inc)
- Graficadores (Hewlett Packard)
- Potenciómetro, mecanismo de freno y clutch (AST/Servo Systems, Inc.)
- Servo Motor (Electro-Craft Co.)
- Transductor de fuerza, acondicionador de señal (Schaevitz Engineering).

c) Modelo de Eyring

Este modelo de fluido no newtoniano predice el comportamiento pseudoplástico para valores finitos de  $\tau_{yx}$  y tiende asintóticamente a la ley de viscosidad de Newton cuando  $\tau_{yx}$  tiende a cero, siendo en este caso  $\mu = A/B$ .

APENDICE C. MODELOS PARA FLUIDOS NO NEWTONIANOS.

a) Modelo de Bingham.

Toda substancia que se comporta de acuerdo con el siguiente modelo de dos parámetros, se denomina "plástico de Bingham".

$$\tau_{yx} = -\mu_0 \frac{dv_x}{dy} + \tau_0 \quad \text{Si } |\tau_{yx}| > \tau_0 \quad (49)$$

$$\tau_{yx} = 0 \quad \text{Si } |\tau_{yx}| < \tau_0 \quad (50)$$

Esta substancia permanece rígida mientras el esfuerzo cortante es menor de un determinado valor  $\tau_0$ , por encima del cual se comporta de forma semejante a un fluido newtoniano.

b) Modelo de Ostwald-de Waele

$$\tau_{yx} = -m \left| \frac{dv_x}{dy} \right|^{n-1} \frac{dv_x}{dy} \quad (51)$$

Esta ecuación de dos parámetros se conoce también con el nombre de "Ley de Potencia". Para  $n=1$  se transforma en la ley de viscosidad de Newton, siendo  $m=\mu$ ; por consiguiente, la desviación del valor de  $n$  con respecto a la unidad es una medida del grado de desviación del comportamiento Newtoniano. Cuando  $n$  es menor que uno el comportamiento es "pseudoplástico", mientras que para valores superiores a la unidad es "dilatante".

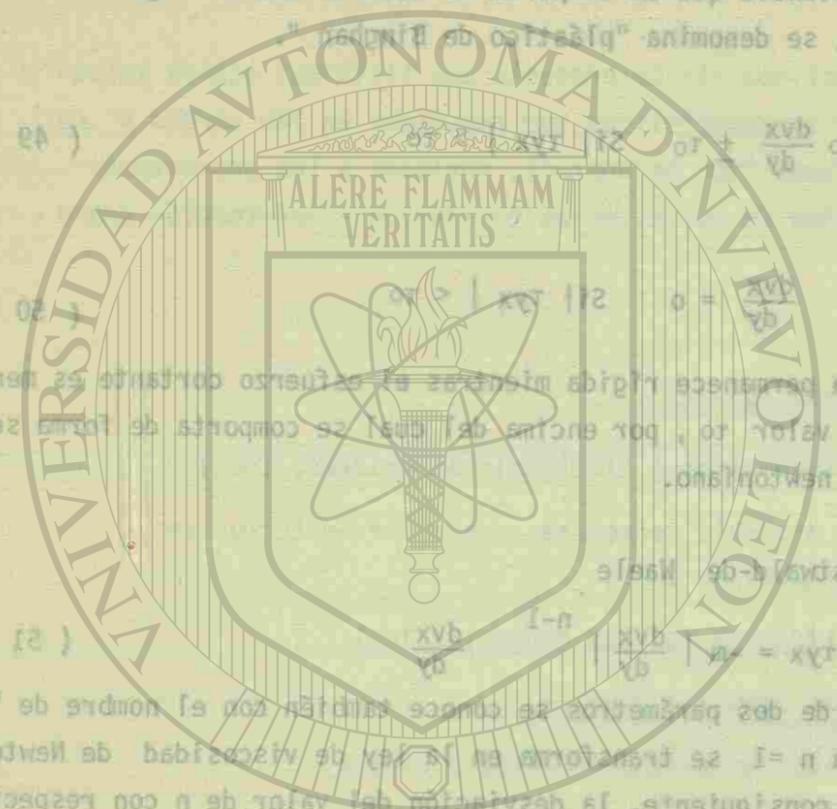
c) Modelo de Eyring

$$\tau_{yx} = A \operatorname{arc} \operatorname{sen} h \left( -\frac{1}{B} \frac{dv_x}{dy} \right) \quad (52)$$

Este modelo de dos parámetros deriva de la teoría cinética de los líquidos, de Eyring, y predice el comportamiento pseudoplástico para valores finitos de  $\tau_{yx}$  y tiende asintóticamente a la ley de viscosidad de Newton cuando  $\tau_{yx}$  tiende a cero, siendo en este caso  $\mu = A/B$ .

a) Modelo de Bingham.

Toda sustancia que se comporta de acuerdo con el siguiente modelo de dos parámetros, se denomina "plástico de Bingham".



$$\frac{dv_x}{dy} = \tau_{yx} - \tau_0$$

Esta sustancia presenta rigidez mientras el esfuerzo cortante es menor de un determinado valor  $\tau_0$ , por encima del cual se comporta de forma semejante a un fluido newtoniano.

b) Modelo de Ostwald-de Waele

$$\tau_{yx} = n \tau_0 \left( \frac{dv_x}{dy} \right)^{n-1}$$

Esta ecuación de dos parámetros se conoce también con el nombre de "Ley de potencia". Para  $n=1$  se transforma en la ley de viscosidad de Newton, siendo  $m=n$ ; por consiguiente, la desviación del valor de  $n$  con respecto a la unidad es una medida del grado de desviación del comportamiento Newtoniano. Cuando  $n$  es menor que uno el comportamiento es "pseudoplástico", mientras que para valores superiores a la unidad es "dilatante".

c) Modelo de Eyring

$$\tau_{yx} = A \exp \left( \frac{1}{B} \frac{dv_x}{dy} \right)$$

Este modelo de dos parámetros deriva de la teoría cinética de los fluidos, de Eyring, y predice el comportamiento pseudoplástico para valores finitos de  $\tau_{yx}$  y tiende estadísticamente a la ley de viscosidad de Newton cuando  $\tau_{yx}$  tiende a cero, siendo en este caso  $\mu = \mu_0$ .

d.- Modelo de Ellis

1. Pye, L.D., Stevens, H.D.  $\frac{dv_x}{dy} = (\phi_0 + \phi_1 |\tau_{yx}|^{\alpha-1}) \tau_{yx}$  ( 53 )

2. Este modelo consta de tres parámetros positivos ajustables:  $\phi_0, \phi_1, \alpha$ . Si se toma para  $\alpha$  un valor mayor que la unidad, el modelo tiende hacia la ley de Newton para valores bajos de  $\tau_{yx}$  mientras que si se elige para  $\alpha$  un valor menor que la unidad, la ley de Newton se establece para valores elevados de  $\tau_{yx}$ . El modelo presenta gran flexibilidad, y en él están comprendidas, como casos particulares, tanto la ley de Newton, ( para  $\phi_1 = 0$  ), como la ley de la potencia ( para  $\phi_0 = 0$  ).

e.- Modelo Reiner - Philippoff

$$\frac{dv_x}{dy} = \left( \frac{1}{\mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + (\tau_{yx}/\tau_s)^2}} \right) \tau_{yx}$$
 ( 54 )

Este modelo tiene tres parámetros positivos ajustables:  $\mu_0, \mu_\infty, \tau_s$ . Teniendo en cuenta que frecuentemente se ha observado que el comportamiento newtoniano se presenta, tanto para valores muy bajos como muy elevados del gradiente de velocidad, este modelo se ha planteado con el fin de que se transforme en estos dos casos límite en la ley de Newton de la viscosidad, haciéndose  $\mu = \mu_0$  y  $\mu = \mu_\infty$  respectivamente. Los puntos de inflexión de la curva de  $\tau_{yx}$  vs  $dv_x/dy$  corresponden a valores de  $\tau_{yx} = \pm \tau_s \sqrt{3\mu_0/\mu_\infty}$ .

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

( 23 )

Este modelo consta de tres parámetros positivos ajustables:

Si se toma  $\phi = 0$ , el modelo se reduce a un valor mayor que la unidad, el modelo tiende hacia la ley de Newton para valores altos de  $\phi$  y hacia la ley de Newton para valores bajos de  $\phi$ . El modelo presenta gran flexibilidad y en él están comprendidos, como casos particulares, tanto la ley de Newton (para  $\phi = 0$ ), como la ley de la potencia (para  $\phi = 1$ ).

( 24 )

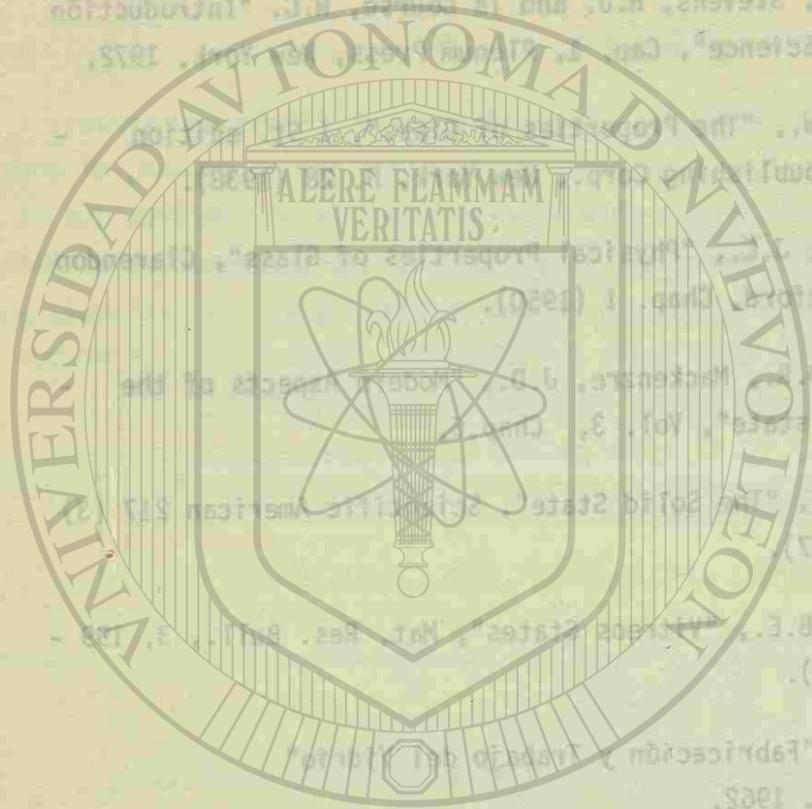
Este modelo tiene tres parámetros positivos ajustables.  $\phi = 0$  se refiere al comportamiento que frecuentemente se ha observado en el comportamiento newtoniano se presenta, tanto para valores muy bajos como muy elevados del gradiente de velocidad, este modelo se ha planteado con el fin de que se transicione en estos dos casos límite en la ley de Newton de la viscosidad, haciendo respectivamente los puntos de inflexión de la curva de  $\eta$  vs  $\dot{\gamma}$  corresponden a valores de  $\dot{\gamma} = \pm \sqrt{2\phi/\mu_0}$ .

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## REFERENCIAS

1. Pye, L.D., Stevens, H.J. and la Course, W.C. "Introducción to Glass Science", Cap. 1, Plenum Press, New York, 1972.
2. Morey, G.W., "The Properties of Glass", I St. edition - Reinhold publishing Corp., New York, P. 28 (1938).
3. Stanworth, J.E., "Physical Properties of Glass", Clarendon Press Oxford, Chap. I (1950).
4. Secrist, D.R., Mackenzre, J.D., "Modern Aspects of the vitreous state", Vol. 3, Chap.6,
5. Mott, N.F., "The Solid State", Scientific American 217 (3) 80-89 (1967).
6. Eckstein, B.E., "Vitreous States", Mat. Res. Bull., 3, 199 - 208 (1968).
7. Hero, A., "Fabricación y Trabajo del Vidrio" Ed. Sintés, 1962.
8. Citado por Fernández Navarro José M., "I Curso Internacional sobre Refractarios y Vidrio" Morelia Mich., Nov., 1979.
9. Shand, E.B., "Glass Engineering Handbook," Cap 2, Mc Graw-Hill book Company. ®
10. Bird, R.B., "Fenómenos de Transporte". Cap.I Ed. Reverté, 1973.
11. Ft Trouton, Proc. Roy. Soc., A77 (1906), 426.

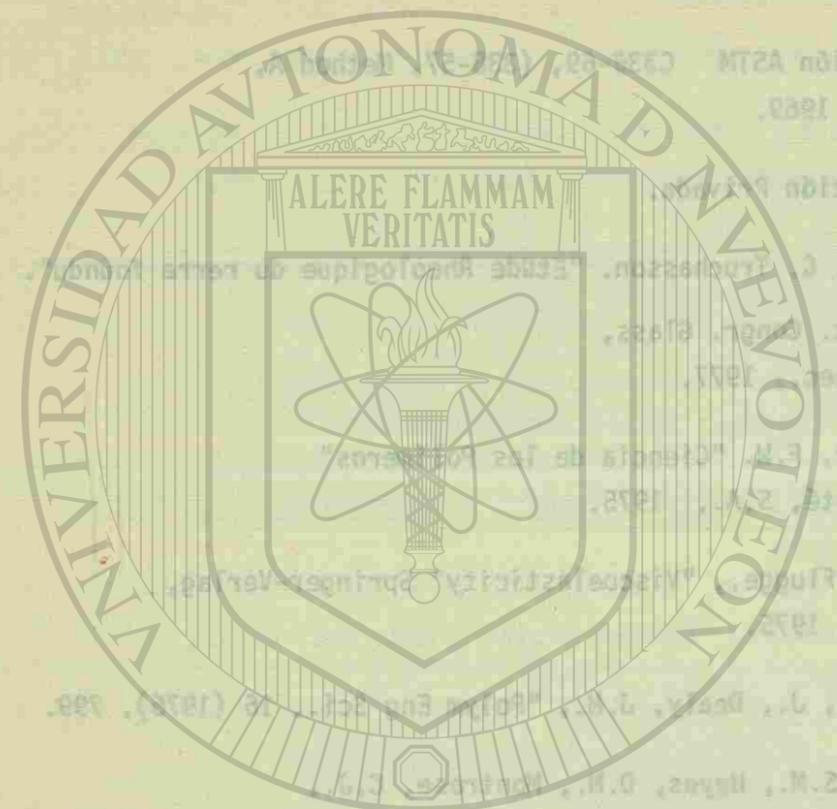
12. Hagy, H.E. "Rheological Behavior of Glass"  
Corning Glass Works.
13. Designación ASTM C336-69, (338-57, Method A,  
Part 13, 1969.
14. Comunicación Privada.
15. M. Merle, C. Truchasson. "Etude Rheologique du verre fondu".  
Xith Int. Congr. Glass,  
Praga, Chec., 1977.
16. Billmeyer, F.W. "Ciencia de los Polímeros"  
Ed. Reverté, S.A., 1975.
17. Wilhelm, Flugge., "Viscoelasticity" Springer-Verlag,  
New York, 1975.
18. Rhi-Sausi, J., Dealy, J.M., "Polym Eng Sci., 16 (1976), 799.
19. Reknson, S.M., Heyes, D.M., Montrose, C.J.,  
Litovitz, T.A., "Comparison of viscoelastic Behavior of Glas  
Whith a Lennard-Jones Model System".,  
XIIth Int. Congr. Glass, Albuquerque, N.M., U.S.A., 1980.
20. Heyes, D.M., Kim, J.J., Montrose, C.J., Litovitz, J.A.,  
(Tobe submitted to the J. Chem. Phys.).
21. Ferry, T.D. "Viscoelastic Properties of Polimers",  
John Wiley and Sons, Inc., New York, 1970.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

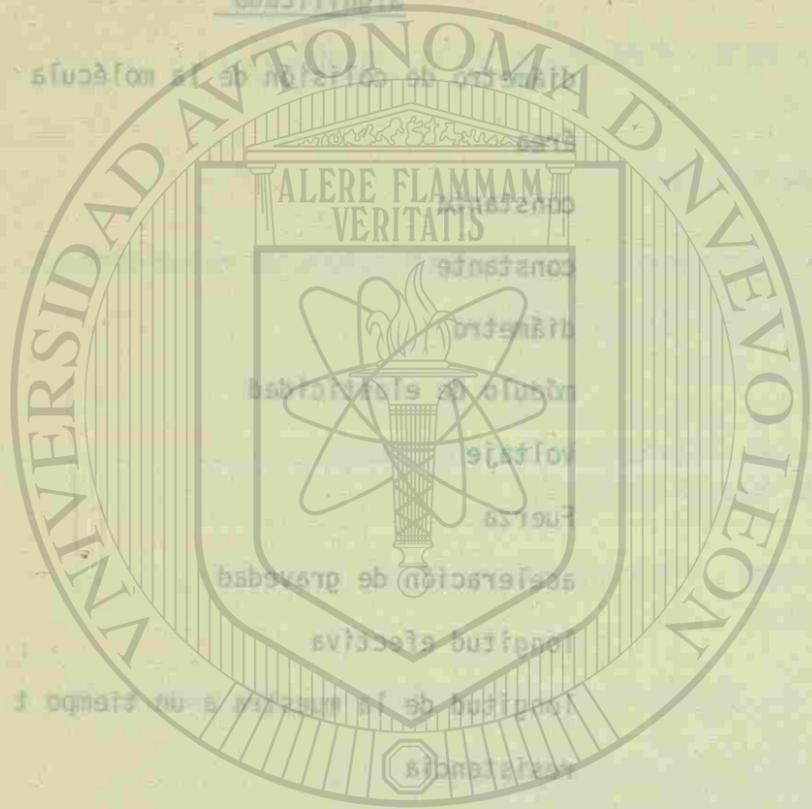
NOMENCLATURA

<u>Símbolo</u>	<u>Significado</u>
a	diámetro de colisión de la molécula
A	área
A'	constante
B'	constante
d	diámetro
E	módulo de elasticidad
e	voltaje
F	Fuerza
g	aceleración de gravedad
l	longitud efectiva
L	longitud de la muestra a un tiempo t
R	resistencia
t	tiempo
T	Temperatura
u	energía de interacción de las moléculas
v	velocidad
w	frecuencia
$\dot{\gamma}$	gradiente de velocidad de corte
$\gamma$	tensión superficial
$\mu$	viscosidad de corte
$\eta$	viscosidad extensional
$\eta(\dot{\gamma})$	viscosidad aparente
$\eta^*$	viscosidad compleja



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

NOMENCLATURA



ALERE FLAMMAM VERITATIS

Símbolo	Significado
$\epsilon$	deformación
$\dot{\epsilon}$	gradiente de velocidad extensional
$\tau_{yx}$	esfuerzo cortante
$\sigma$	esfuerzo normal
$\rho$	densidad
$J(t)$	Creep compliance
$J^*$	compliance compleja
$J'(w)$	compliance compleja, parte real
$J''(w)$	compliance compleja, parte imaginaria
$\gamma(t)$	módulo de relajación
$\phi(r)$	Potencial de Lennard-Jones
$T$	Temperatura
$v$	velocidad
$\omega$	frecuencia
$\gamma$	tensión superficial
$\eta$	viscosidad de corte
$\bar{\eta}$	viscosidad extensional
$\eta_a$	viscosidad aparente
$\eta_c$	viscosidad compleja

CONTINUACION NOMENCLATURA

Símbolo	Significado
$\epsilon$	deformación
$\dot{\epsilon}$	gradiente de velocidad extensional
$\tau_{yx}$	esfuerzo cortante
$\sigma$	esfuerzo normal
$\rho$	densidad
$J(t)$	Creep compliance
$J^*$	compliance compleja
$J'(w)$	compliance compleja, parte real
$J''(w)$	compliance compleja, parte imaginaria
$\gamma(t)$	módulo de relajación
$\phi(r)$	Potencial de Lennard-Jones

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



