

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA



VIDRIO TEMPLADO: TEORIA Y SOLUCION DE
UN PROBLEMA INDUSTRIAL

TESIS

QUE PRESENTA

LIC. EDUARDO CARDENAS ALEMAN

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

MONTERREY, N. L.

ABRIL DE 1991

TM

25853

.M2

FIME

1991

C3



1020070534



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
ELECTRICA**



**VIDRIO TEMPLADO: TEORIA Y SOLUCION DE
UN PROBLEMA INDUSTRIAL**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

TESIS

**DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
QUE PRESENTA**

LIC. EDUARDO CARDENAS ALEMAN

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

MON , N. L.

ABR'L DE 1991

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



VIDRIO TEMPLADO : TEORIA Y SOLUCION DE
UN PROBLEMA INDUSTRIAL

TESIS
QUE PRESENTA

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

LIC. EDUARDO CARDENAS ALEMAN



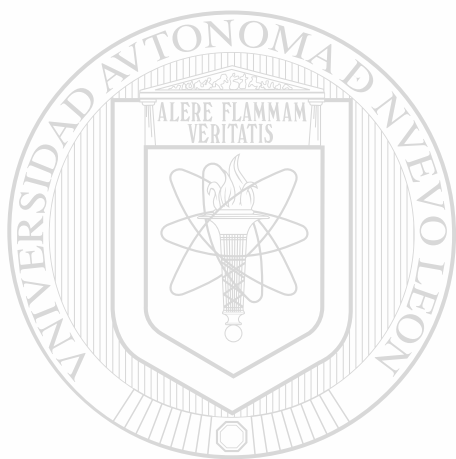
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA

MECANICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

MONTERREY, N.L. ABRIL DE 1991

TM
ZS853
.M2
FIME
199
3

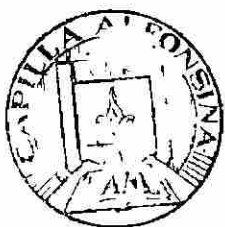


UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



FONDO TESIS

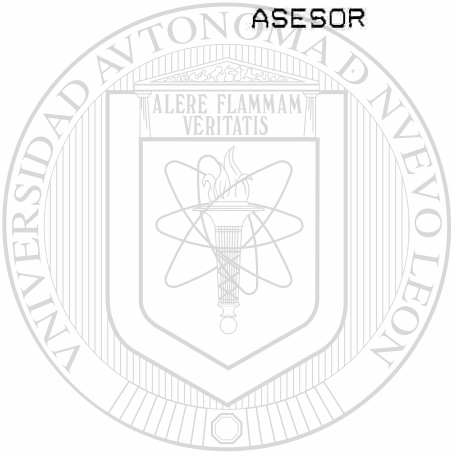
163702



DR. RAUL FUENTES S.
ASESOR



DR. OMAR YAGUE M.
ASESOR




UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DR. UBALDO ORTIZ M.
REVISOR

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

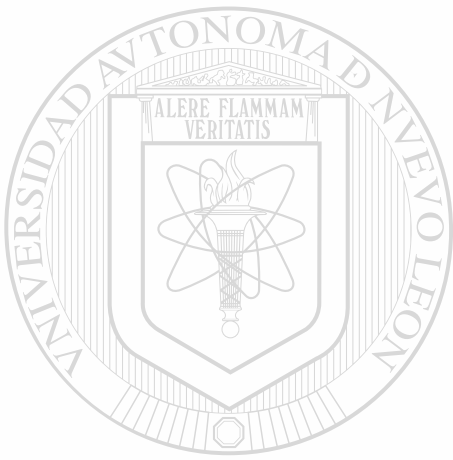


DEDICO ESTE TRABAJO

A MI ESPOSA SILVIA

A MIS PADRES Y HERMANOS

A MIS FAMILIARES



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

AGRADECIMIENTOS

- o AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGIA PORQUE GRACIAS A SUS OBJETIVOS SE HICIERON POSIBLES MIS ESTUDIOS DE POSGRADO.
- o A LA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON Y A SU FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA.
- o AL PERSONAL DOCENTE Y ADMINISTRATIVO DEL DOCTORADO EN INGENIERIA DE MATERIALES.
- o A VITROTEC, ESPECIALMENTE AL DR. ANTONIO PITA POR HABERME INVITADO A PARTICIPAR EN ESTE PROGRAMA DE POSGRADO Y AL LIC. JORGE LOREDO MURPHY POR SU APOYO A LO LARGO DE TODA ESTA ETAPA.
- o A LA EMPRESA CON LA QUE PARTICIPAMOS EN LA REALIZACION DE ESTE PROYECTO, ESPECIFICAMENTE AL ING. EDMUNDO GARCIA E ING. MIGUEL A. OLIN Y SU EQUIPO DE TRABAJO.
- o QUIERO EXPRESAR MI MAS SINCERO AGRADECIMIENTO A LOS DOCTORES : RAUL FUENTES, OMAR YAGUE Y UBALDO ORTIZ QUE MAS QUE PROFESORES DE PIZARRON FUERON MAESTROS EN EL CAMPO DE TRABAJO Y COMPANEROS DE EQUIPO Y NUEVAMENTE AL DR. RAUL FUENTES POR HABERME HECHO PARTICIPE DE LA VINCULACION UNIVERSIDAD-INDUSTRIA QUE LOGRO.
- o A TODAS LAS PERSONAS QUE CONTRIBUYERON DE UNA FORMA U OTRA A LA REALIZACION DE ESTE TRABAJO.

CONTENIDO

	<u>INTRODUCCION</u>	1
1	<u>GENERALIDADES DEL PROCESO DE FABRICACION DE VIDRIO PLANO</u>	
	1.1 MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACION DE VIDRIO	5
	1.2 PROCESO DE ELABORACION DEL VIDRIO	12
	1.3 FABRICACION DE VIDRIO PLANO	20
2	<u>VIDRIO TEMPLADO</u>	
	2.1 TEMPLADO DEL VIDRIO PLANO	30
	2.2 MANUFACTURA DE CRISTAL AUTOMOTRIZ	34
3	<u>TERMOELASTOPLASTICIDAD APLICADA A LA DETERMINACION DE ESFUERZOS RESIDUALES EN EL VIDRIO TEMPLADO</u>	
	3.1 INTRODUCCION	39
	3.2 FORMULACION GENERAL DEL PROBLEMA	
	TERMOELASTOPLASTICO	41

3.3	APLICACION A CILINDROS AXISIMETRICOS	44
3.4	APLICACION AL TEMPLADO DE VIDRIO PLANO	49
3.5	CONCLUSIONES	54

4 RAYABILIDAD DEL VIDRIO TEMPLADO : DIAGNOSTICO, ANALISIS Y SOLUCION DEL PROBLEMA.

4.1	ANTECEDENTES	56
4.2	CUANTIFICACION DE LA RAYABILIDAD	57
4.3	DIAGNOSTICO	58
4.4	" HAZE " EN VIDRIOS TEMPLADOS	62
4.5	FUENTES DE CONTAMINACION DE PARTICULAS	64
4.6	EFFECTO DEL SO ₂ EN LA RAYABILIDAD	68
4.7	AUDITORIA A LAVADORAS	71
4.8	CONCLUSIONES	74

5 EVALUACION ECONOMICA DEL PROYECTO 94

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

APENDICE A

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

PROGRAMA DE SIMULACION DE ESFUERZOS EN EL TEMPLADO DE

VIDRIO PLANO	98
--------------	----

BIBLIOGRAFIA

INTRODUCCION

El trabajo que se presenta a continuación, está constituido principalmente por tres partes. En la primera se describen generalidades del proceso de fabricación del vidrio plano, partiendo desde las materias primas que se utilizan. Se describe en forma breve el proceso de fusión y acondicionamiento térmico necesarios para la adecuada conformación de artículos de vidrio.

Sólo se mencionan y describen los sistemas de manufactura utilizados en la producción de vidrio plano ya que este se utiliza como materia prima para la fabricación de cristal automotriz, tema central de este estudio. En el capítulo 2 se incluyen las etapas del proceso de templado que se sigue en las industrias productoras de cristal de seguridad para uso automotriz.

En la segunda parte, se expone un desarrollo teórico en el que se resuelve el problema de la evolución de los esfuerzos termoelastoplásticos en el tiempo y la determinación de los esfuerzos residuales en un cilindro sólido homogéneo e isotrópico sujeto a una historia térmica dada y a presión hidrostática tanto interior como exterior. El problema termoelastoplástico se plantea a partir de la ecuación de equilibrio y de exigir la compatibilidad del tensor de deformación total

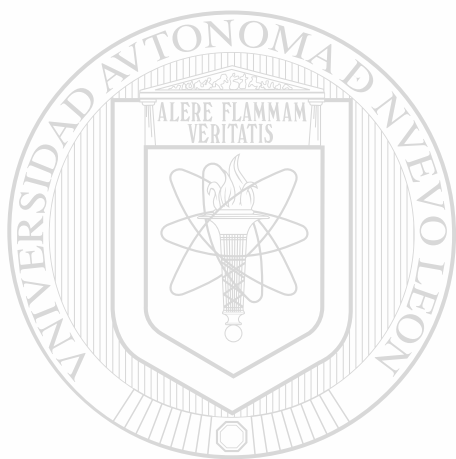
$$e_{ij}^t, \text{ i.e. } \sigma_{i,j,j} = 0 ; \text{ y } \nabla \times e^t \times \nabla = 0 .$$

donde la deformación total es la suma de las deformaciones

elásticas, térmicas y plásticas. Para encontrar las deformaciones plásticas en condiciones de carga multiaxial se utilizan las ecuaciones Prandtl-Reuss junto con la ecuación constitutiva que relaciona la velocidad de deformación plástica con la temperatura y el esfuerzo aplicado en un sistema de carga uniaxial. El problema se plantea y resuelve para el caso de un cilindro hueco de vidrio sujeto a gradientes de temperatura, presiones interiores y exteriores, y se utiliza esta solución para modelar el templado de vidrio plano. La evolución de los esfuerzos y los esfuerzos residuales se obtienen a través de una integración numérica de la solución.

La última parte corresponde a un trabajo de investigación aplicada que se realizó para una Industria productora de Vidrio Templado. El problema consistía en una notable disminución de la calidad superficial de la totalidad de la producción de vidrio templado, lo cual se reflejaba en marcada susceptibilidad a rayarse, esto le restaba calidad al producto peligrando su competitividad en el extranjero. Actualmente este problema se ha resuelto y el total de la producción de vidrio templado cumple con los estándares de calidad más estrictos en el mercado internacional permitiendo a esta empresa mantenerse con los índices de calidad de producto más altos en el mercado. En la primera etapa del proyecto se realizó trabajo experimental a efecto de determinar las causas que originaban la debilidad superficial de los cristales y el mecanismo bajo el cual se dañaba

la superficie. De esta manera se diagnosticó el problema y se estableció el criterio genérico para su solución. En esta sección se presenta un resumen secuencial de las actividades realizadas para establecer el diagnóstico del problema y la implementación de las medidas preventivas. Como parte complementaria se anexa una breve evaluación de los beneficios originados por el proyecto.

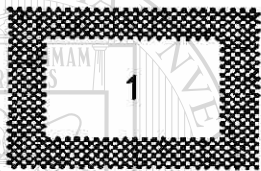
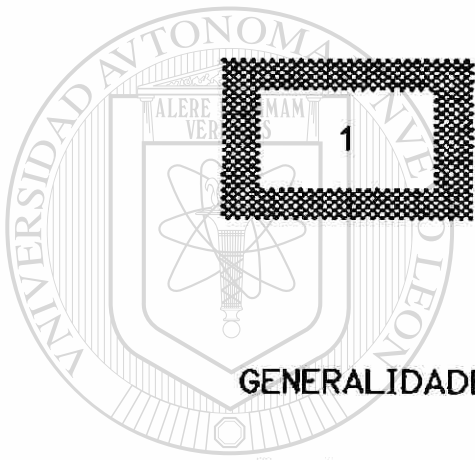


UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



UANL

GENERALIDADES DEL PROCESO DE FABRICACION DE
VIDRIO PLANO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

1.1 MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACION DE VIDRIO

Las materias primas empleadas en la fabricación de vidrios convencionales se clasifican principalmente en 4 grupos según su comportamiento en el proceso de fusión, estos son :

- Vitrificantes
- Fundentes
- Estabilizantes
- Componentes Secundarios

SILICE

La sílice es el principal elemento en la mayoría de los vidrios comerciales, formando aproximadamente tres cuartas partes de su composición. La principal fuente de sílice para la industria del vidrio la constituyen las arenas de cuarzo, cuyo uso depende de sus características mineralógicas, químicas y granulométricas.

La proporción de sílice en la arena debe estar en el rango 98.5 - 99.5 % permitiéndose de 0.1 a 0.5 % de Al_2O_3 vía impurezas (feldespatos, caolín, etc.). De los minerales pesados contaminantes, tabla 1, se permite hasta 0.1% debido a problemas de coloración y formación de inclusiones en el producto final, por ejemplo, el contenido de Cr_2O_3 se limita de 0.0002 a 0.0006 % mientras que el de Fe_2O_3 se permite de 0.003 a 1 % según sea el tipo de vidrio, tabla 2.

Mineral	Fórmula	Densidad (g/cm ³)
Anfiboles	Metasilicatos con grupos OH ⁻ o F ⁻	2.9 - 3.7
Anizónita	Fe ₂ (TiO ₄) ₃	4.5
Cassiterita	SnO ₂	6.8 - 7.1
Circón	ZrSiO ₄	3.9 - 4.8
Corindón	Al ₂ O ₃	3.9 - 4.1
Cromita	(Fe, Mg) Cr ₂ O ₄	4.5 - 4.8
Distena	Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	3.6 - 3.7
Epidota	Ca ₂ (Fe, Al)Al ₂ Si ₃ O ₁₁ (OH)	3.3 - 3.5
Fespatita	MgO·Al ₂ O ₃	3.5
Goethita	FeO·OH	3.8 - 4.1
Ilmenita	FeO·TiO ₂	4.5 - 5.0
Magnetita	FeO·Fe ₂ O ₃	5.2
Olivino	MgO·FeO·SiO ₂	3.2 - 4.2
Pirita	FeS ₂	5.0 - 5.2
Titoxenos	Metasilicatos de elementos divalentes	3.1 - 3.5
Rutilo	TiO ₂	4.2 - 4.3
Titanita	CaO·TiO ₂ ·SiO ₂	3.4 - 3.6
Topacio	Al ₂ SiO ₄ (F, OH) ₂	3.5 - 3.6
Urnmalina	NaF ₃ (AlF) ₆ (OH) ₂ /(BO ₃) ₂ ·Si ₆ O ₁₈	3.0 - 3.2
Zoisita	Ca ₂ Al ₂ Si ₂ O ₁₁ (OH)	3.2 - 3.4

Tabla 1. Principales minerales contaminantes de las arenas de cuarzo que se utilizan en la industria del vidrio.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tipo de vidrio	Fe ₂ O ₃ (%)
Óptico	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	0.030 - 0.050
Vidrio semiblanco	0.050 - 0.100
Vidrio de botella verde	0.300 - 1.00

Tabla 2. Concentraciones máximas de Fe₂O₃ permitidas en las arenas de cuarzo para distintos tipos de vidrio.

ANHIDRIDO BORICO

Es un componente esencial de los vidrios neutros para laboratorio, de vidrios resistentes al choque térmico, de la fibra de vidrio y de vidrios especiales. Los vidrios de borosilicato constituyen un grupo aparte debido a sus características estructurales y aplicaciones. El B_2O_3 es un aditivo en los vidrios sódico-cálcicos ordinarios ya que acelera su fusión, mejora su estabilidad química y su resistencia al choque térmico. Además de las fuentes naturales. La industria vidriera emplea como principales materias primas bóricas, productos químicos preparados, tales como ácido bórico y borato de sodio.

ANHIDRIDO FOSFORICO

El P_2O_5 se limita únicamente a algunos vidrios ópalos, y a vidrios de propiedades ópticas especiales por su transparencia en el ultravioleta y su baja transmisión en el infrarojo.

FUNDENTES

Modificadores de red que favorecen la formación de vidrio al disminuir la temperatura de fusión.

OXIDO DE SODIO

De los óxidos alcalinos , el de sodio es el que aparece en mayor proporción en los vidrios ordinarios. Se introduce al vidrio vía Carbonato de Sodio. Por los diversos problemas que se presentan , sólo de un 20 a 25 % de Na_2O del vidrio se agrega vía Sulfato de sodio.

OXIDO DE POTASIO

Usualmente el óxido de potasio se introduce en el vidrio a partir de carbonato de potasio. Debido a que el ion de potasio es mas grande que el de sodio, los vidrios con potasio son más viscosos que los que contienen sodio.

OXIDO DE CALCIO

Su presencia en el vidrio aumenta la estabilidad química y mecánica. Desde el punto de vista funcional, actúa como estabilizante aunque estructuralmente tiene el carácter de modificador de red. La materia prima que se emplea para introducir el óxido de calcio es la caliza natural (CaCO_3), la cual debe tener un contenido mínimo de 55.2 % de CaO .

OXIDO DE MAGNESIO

Desempeña un papel semejante al CaO . La materia prima más

utilizada para introducir MgO al vidrio es la dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$).

OXIDO DE BARIO

El BaO aumenta la densidad, índice de refracción y brillo. Debido a su elevado radio iónico, aumenta la viscosidad, le hace más moldeable e incrementa el intervalo de trabajo. Se utilizan los nitratos y carbonatos de bario.

ESTABILIZANTES

OXIDO DE ALUMINIO

La incorporación de Alúmina origina un aumento de la resistencia mecánica, mejora la estabilidad química, aumenta la refractariedad, disminuye el coeficiente de dilatación térmica, mejora la resistencia al choque térmico, reduce la tendencia a la devitrificación, aumenta la viscosidad y el intervalo de trabajo. En la mayoría de los vidrios sódico-cálcicos comerciales se utiliza de 1-3% de Al_2O_3 . Las materias primas que más se utilizan para incorporar Al_2O_3 en el vidrio son los feldspatos debido a que funden a temperaturas relativamente bajas y se incorporan fácilmente. En algunos casos se utilizan bauxita, caolines y algunas rocas aluminosas.

OXIDO DE PLOMO

El óxido de plomo es uno de los componentes que más enoblecen la calidad del vidrio, proporcionándole un alto índice de refracción, brillo, aumento de densidad y sonoridad. Los vidrios de Pb deben fundirse en atmósferas fuertemente oxidantes. El principal inconveniente que presentan es que son más blandos que los sódico-cálcicos ordinarios. El PbO se introduce casi siempre bajo la forma Pb_3O_4 , a veces como Carbonato básico y raramente como PbO .

OXIDO DE ZINC

La adición de óxido de zinc en proporciones hasta del 5% resulta generalmente favorable a la mayoría de los vidrios comunes. Este componente actúa mejorando la resistencia química, elevando el índice de refracción, aumentando la dureza y reduciendo el coeficiente de dilatación térmica. Las principales materias primas que se utilizan son el $ZnCO_3$ y ZnO .

En la fabricación del vidrio, intervienen otros constituyentes minoritarios con funciones específicas: colorantes, decolorantes opacificantes, fluidificantes, agua, cullet, etc.

COMPOSICION EN OXIDOS			COMPOSICION DE LA MEZCLA VITRIFICABLE						
			partes en peso de materia prima (C)						
			66.51 ARENA (99.2 % SiO ₂)	9.04 FELDESPATO (65.6 % SiO ₂ , 17.8 % Al ₂ O ₃ , 10.3 % Na ₂ O 6.3 % K ₂ O)	19.82 SOSA (Na ₂ CO ₃)	1.36 CARBONATO POTASICO (K ₂ CO ₃)	10.82 DOLOMITA (21.9% MgO 30.3 % CaO)	11.55 CALIZA (CaCO ₃)	
OXIDO	mol %	peso %	% de oxidos incorporado con cada materia prima						
SiO ₂	71.31	71.91	65.98	5.93					Σ = 71.91 SiO ₂
Al ₂ O ₃	0.95	1.61		1.61					Σ = 1.61 Al ₂ O ₃
Na ₂ O	12.10	12.52		0.93	11.59				Σ = 12.52 Na ₂ O
K ₂ O	1.17	1.84		0.57		1.27			Σ = 1.84 K ₂ O
MgO	2.52	2.37					2.37		Σ = 2.37 MgO
CaO	10.43	9.75					3.28	5.47	Σ = 9.75 CaO
	100.00	100.00	peso de materia prima con referencia a 100 partes de arena (C)						
			100.00	13.59	23.80	1.30	13.27	17.37	Σ = 100.00

Vidrio sódico - cálcico

Tipo de vidrio	Componentes (peso %)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	BaO	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	Otros [®]
Plano estirado	71-75	0.5-2	—	12.5-15	0-1	1-4	4-10	—	—	<0.3	—
Plano flotado	70-71.5	0.5-1.5	—	13-14	0-1	4-5	8-9.5	—	—	<0.3	—
Semiblanco para envases	69-73	1-2.5	—	12-15	0-2	1-2.5	8-10	0.5	—	<0.1	—
Verde para envases	65-71	1-5	—	12-16	0-1	1-2	8-12	—	—	0.2-2	Cr ₂ O ₃ 0.1-0.3
Servicio de mesa	71-74	1-2	—	11-15	0-4	0-2	7-9	0-3	—	<0.02	—
Bombillas y tubos	70-72	0.5-1.5	—	15-17	0-1	2.5-4	5-6	0-2	—	<0.05	—
Material de laboratorio	71-73	1.5-4.5	5-7	6-8	0-1	2-4.5	2-4	0-3	—	<0.1	—
Farmacéutico neutro	70-75	3-9	5-9	6-9	0-1	0-1	3-7	2-4	—	<0.1	—
Termómetros	50-72	2-5	2-10	10-14	—	0-5	0-7	—	—	<0.05	ZnO 0-7
Fibra	53-64	5-15	5-9	1-14	0-1	0-5	2-15	—	—	<0.1	—
Cristal	55-62	—	0-1	0-3	8-14	—	0-3	0-3	24-35	<0.01	ZnO 0-1
Flint ordinario	43-45	—	—	1-2	7-8	—	—	—	47-59	<0.01	—
Crown de silicato	63-69	—	2-2.5	4-5	15-16	—	0-8	0-11	0-1	<0.01	ZnO 2-3
Crown de fosfato	—	2-8	2-3	—	—	—	—	28-38	—	<0.01	P ₂ O ₅ 56-60

Diferentes tipos de vidrio

Figura 1. Composición química de vidrios comunes

1.2 PROCESO DE ELABORACION DEL VIDRIO

Se puede considerar que el proceso de fabricación del vidrio está formado por las siguientes seis etapas.

- Reacción de los componentes y formación del vidrio.
- Disolución del excedente de sílice sin reaccionar.
- Afinado y homogenización.
- Reposo y Acondicionamiento térmico.
- Conformación
- Enfriamiento y Recocido

Las primeras cuatro etapas ocurren en el horno de fusión, donde la materia vitrificable experimenta un aumento de temperatura hasta un máximo de unos 1550 °C seguido de un enfriamiento y de un período de estabilización en el que la masa vítrea debe alcanzar la homogeneidad térmica requerida para su conformación.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

REACCIONES DE LOS COMPONENTES Y FORMACION DE VIDRIO
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La formación de vidrio comprende una serie de transformaciones físicas y reacciones químicas en alta temperatura. Durante este proceso los componentes de la mezcla experimentan múltiples modificaciones que incluyen transformaciones cristalinas, evaporación de agua, deshidratación de sales, disociación de los carbonatos y sulfatos, reacciones químicas, fusión, disolución. La simultaneidad con que se producen algunas de estas

transformaciones físico-químicas y el elevado número de componentes que intervienen en los sistemas de la mayoría de los vidrios, hacen muy complejo el estudio de los equilibrios de todas estas reacciones. Aunque las reacciones químicas entre los componentes de la mezcla vitrificable empiezan a producirse a bajas temperaturas, mientras éstos se hallen todavía en estado sólido, transcurren con lentitud hasta que se alcanza la temperatura de formación de los primeros eutécticos, y tiene lugar la aparición de fase líquida. La tabla 3 muestra las reacciones que se producen durante el calentamiento de una mezcla vitrificable correspondiente a un vidrio sódico-cálcico industrial.

Temperatura (°C)	Transformación
- 500	$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 + \text{MgCO}_3$ $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$
750	Formación de $x\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot y\text{CaCO}_3$
< 780	Formación de $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$
780	Fusión del eutéctico $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot x\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot y\text{CaCO}_3$ Fusión del resto del compuesto $x\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot y\text{CaCO}_3$
834	Fusión del eutéctico $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$
> 900	Aparición de la primera fase líquida que puede ser enfriada en estado vítreo. El cuarzo empieza a disolverse en esta fase líquida.
1088	Punto de fusión del $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$

Tabla 3. Reacciones producidas durante la formación de vidrios sódico-cálcicos.

DISOLUCION DEL EXCEDENTE DE SILICA SIN REACCIONAR.

Después de haber reaccionado entre sí los componentes de la mezcla vitrificable y de haber dado lugar a la formación de una fase fundida, todavía queda un exceso de sílica no incorporada al vidrio. Su incorporación se lleva acabo mediante un proceso de disolución, gobernado por un proceso difusional. Un fenómeno característico que se produce durante la disolución de la sílica en el vidrio es la formación de numerosas burbujas producidas por el aumento de acidez que experimenta el fundido. En la primera etapa de reacción y fusión el fundido era muy alcalino y ello favorecía la disolución química de cantidades importantes de CO_2 , SO_3 y vapor de agua. Pero al irse incorporando la sílice, el vidrio se va haciendo cada vez más ácido y la solubilidad de dichos gases disminuye produciéndose segregación en forma de burbujas.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

AFINADO Y HOMOGENIZACION DEL VIDRIO

DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS

El proceso de homogenización del vidrio y de la eliminación de parte de los gases disueltos y de las burbujas ocluidas se denomina afinado. Durante este proceso, uno de los aspectos de mayor importancia es el de la interacción del vidrio con las fases gaseosas que se encuentran en contacto con él. Su importancia radica no solo en la complejidad y diversidad de las reacciones que tienen lugar, sino también en sus repercusiones prácticas, ya

que el equilibrio vidrio-gas determina la disolución gaseosa, la formación y eliminación de las burbujas y en definitiva, el grado de calidad del producto obtenido. La tabla 4 describe la interacción vidrio-gas en las diferentes etapas del proceso de elaboración del vidrio mientras que en la tabla 5 se indican las principales fuentes de aportación de gas al vidrio.

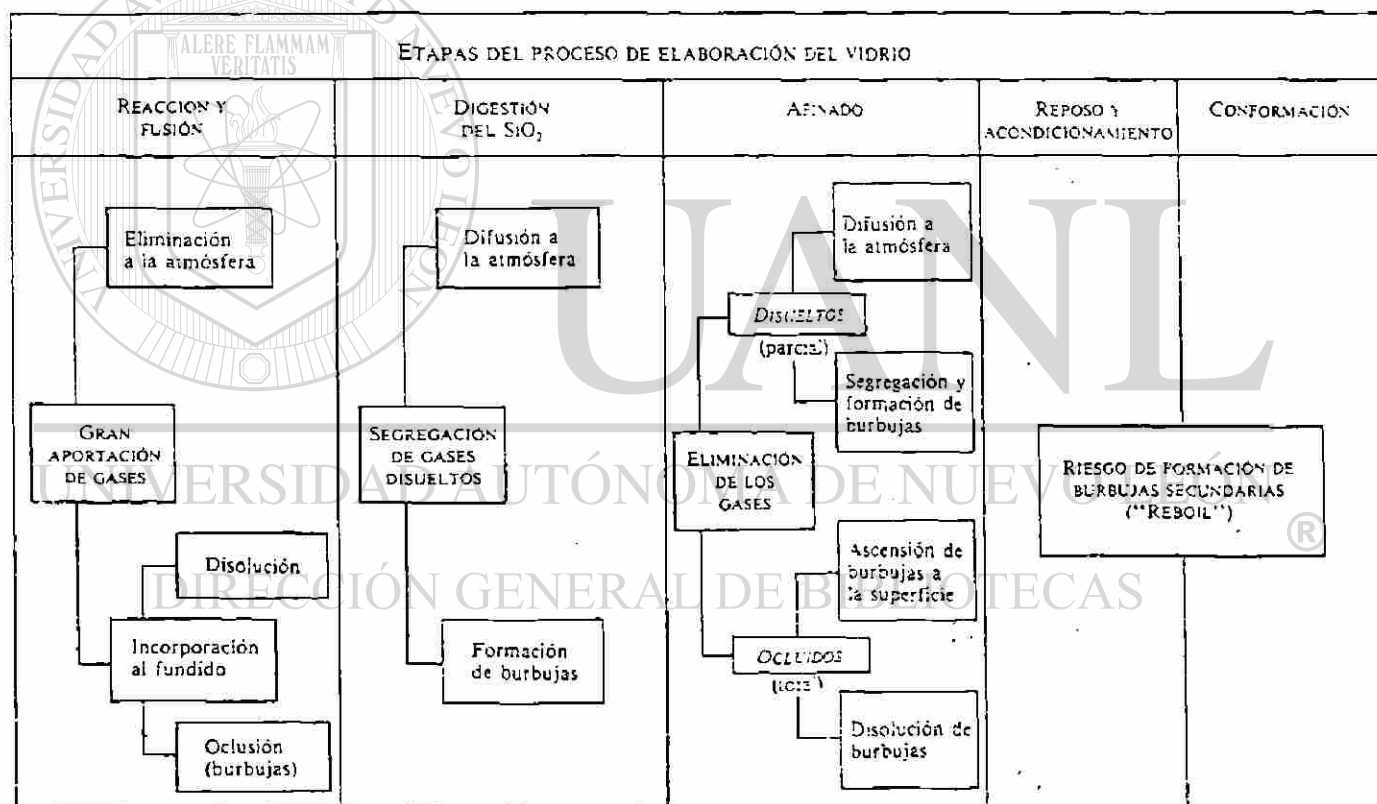


Tabla 4. Interacción vidrio - gas en las diferentes etapas del proceso de elaboración del vidrio.

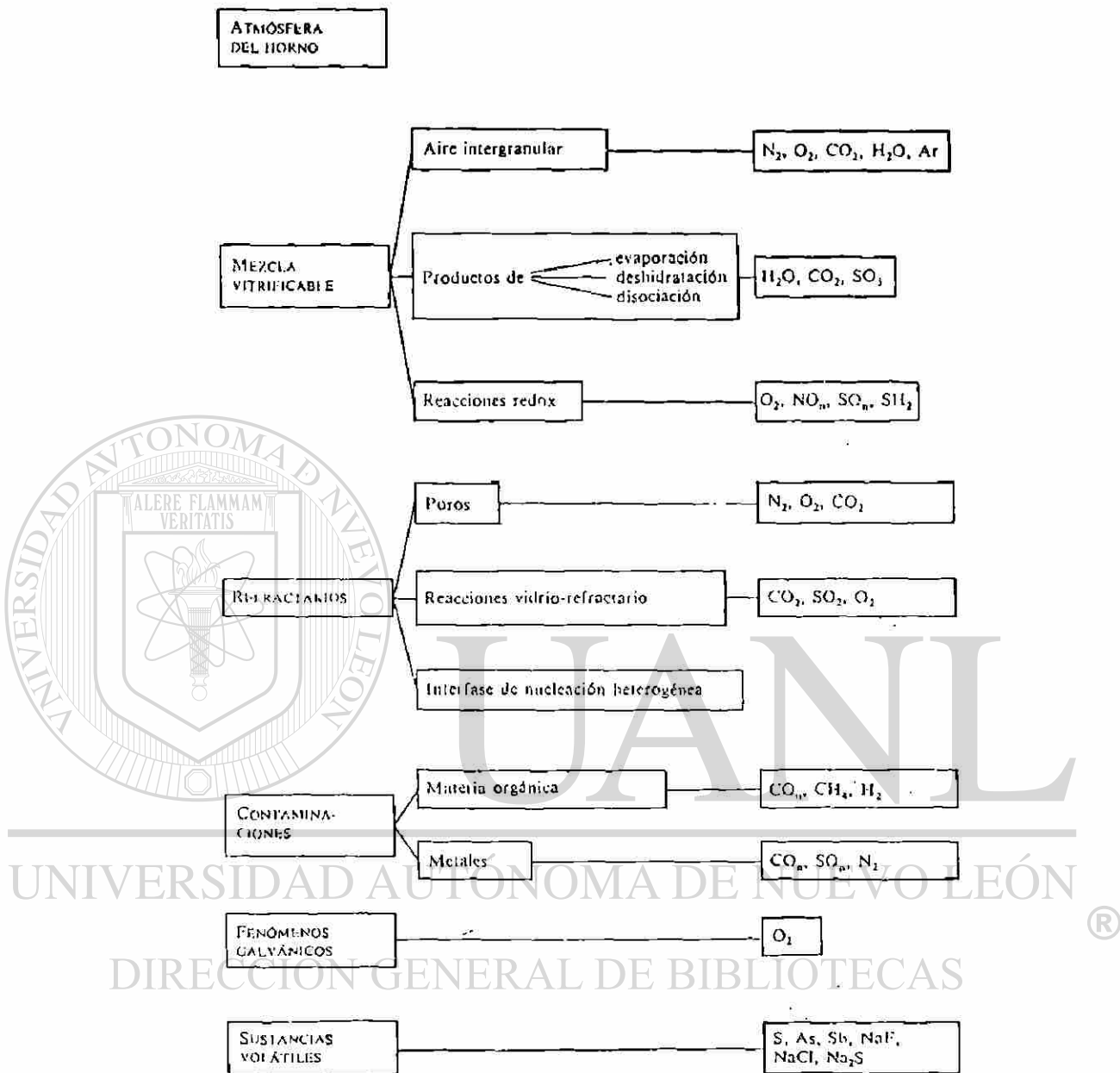


Tabla 5. Principales fuentes de aportación gaseosa al vidrio durante las etapas de reacción de sus componentes.

PROCEDIMIENTO DE AFINADO

Mientras que gran parte de las burbujas formadas en el vidrio llegan por sí solas a la superficie y rompen en ella, otras de menor tamaño o situadas a mayor profundidad, no disponen de tiempo suficiente para escapar de la masa fundida. La eliminación de éstas burbujas puede realizarse mediante procedimientos químicos, térmicos o mecánicos.

AGENTES QUÍMICOS DE AFINADO

Todos los procedimientos químicos de afinado poseen como característica común la adición al vidrio de sustancias que se descompongan térmicamente dando lugar a un intenso desprendimiento de gases. Las burbujas formadas son de mayor tamaño, lo que les permite ascender en poco tiempo a la superficie al mismo tiempo que arrastran a las burbujas más pequeñas que se encuentran a su paso, homogenizando así, las capas estratificadas de vidrio. ®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Para que se pueda aprovechar al máximo el potencial gaseoso de los afinantes, éstos deben tener una elevada tensión de descomposición, lo que les permitirá retrasar su evolución gaseosa hasta zonas de alta temperatura en las que el fundido haya cedido ya la mayor parte de sus gases y en las que la viscosidad de éste sea lo suficientemente baja para facilitar la ascensión y eliminación de las burbujas nacientes.

Los gases cedidos por la sustancia afinante deben ser, en lo posible, diferentes de los que se hallan ocluidos en las burbujas que se tratan de eliminar. De este modo, si la burbuja no contiene el gas que actúa como afinante, la presión parcial de éste en el interior de la misma será lógicamente nula y bastarán bajas presiones de descomposición del gas afinante para conseguir su difusión en el interior de la burbuja y acelerar su crecimiento. Recíprocamente en las burbujas grandes formadas por el gas afinante se favorecerá la penetración por difusión de los gases aún disueltos en el fundido, disminuyendo así progresivamente su contenido gaseoso. Ya que las burbujas formadas después de las etapas de reacción y absorción de la sílice están constituidas por CO_2 , N_2 , H_2O , se emplean preferentemente afinantes que produzcan O_2 y SO_2 . Las burbujas pequeñas que se mantienen en el vidrio después de la etapa de afinado serán absorbidas durante la etapa de enfriamiento. Como agentes afinantes principalmente se emplean sulfatos (que liberan SO_2), óxidos de arsénico y antimonio junto con nitratos, (liberando O_2), óxidos y peróxidos que aportan O_2 , halogenuros que se volatilizan y cloratos y percloratos que también forman O_2 .

PROCEDIMIENTOS FISICOS DE AFINADO

El movimiento de agitación del fundido debido al desplazamiento de las burbujas no siempre resulta suficiente para lograr una buena homogenización.

Por eso, esta acción química se refuerza mediante otras acciones de tipo físico. La más común de todas consiste en provocar un calentamiento brusco. Por una parte se produce una fuerte desgasificación del vidrio y por otra la disminución que experimenta la viscosidad acelera el movimiento de ascensión de las burbujas. Un aumento de 50°C puede reducir a la mitad el tiempo de afinado. Un aumento excesivo de la temperatura incrementa la volatilización del vidrio y la corrosión del material refractario. Otro recurso, frecuentemente usado, es el de introducir en el horno, sistemas de inyección gaseosa, llamados borboteadores, para producir un burbujeo continuo. Las burbujas suelen ser de gran tamaño y constituyen un buen método de agitación y de arrastre de las pequeñas inclusiones gaseosas que encuentren a su paso.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

REPOSO Y ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO

El propósito de esta etapa es lograr que el vidrio alcance homogeneidad térmica al mismo tiempo que su temperatura disminuya hasta la temperatura de fabricación. Al homogenizar la temperatura, la viscosidad se homogeniza logrando obtener velocidades de flujo de vidrio similares. Con el acondicionamiento térmico concluye el proceso de fusión del vidrio y éste queda en disposición de ser extraído y moldeado en su forma definitiva.

1.3 FABRICACION DE VIDRIO PLANO

La idea de fabricar una hoja de vidrio por un procedimiento de estirado mecánico fué desarrollada casi simultáneamente en Bélgica por Fourcault (1902) y en Estados Unidos por Colburn (1903). La finalidad, era conseguir extraer verticalmente , del baño de vidrio una lámina rectangular continúa que inmediatamente después de emerger, fuese cuidadosamente enfriada.

SISTEMA COLBURN-LIBBEY-OWENS

En el procedimiento ideado por Colburn y explotado industrialmente por la firma Libbey-Owens, la hoja nace directamente de la superficie del vidrio fundido, como se muestra en la figura 2. Dos pares de rodillos dentados refrigerados por agua, sujetan la lámina por sus bordes y ejercen sobre ella una tracción ascendente. Después de un breve recorrido de unos 60-70 cm (donde la hoja recién formada disipa parte de su calor), pasa entre dos pantallas metálicas refrigeradas y luego doblada en ángulo recto sobre un rodillo de acero pulido. A partir de ese momento, avanza en dirección horizontal a través de un túnel o canal de enfriamiento de unos 60 m, deslizándose bajo su propio peso sobre una serie de rodillos transportadores forrados de asbesto . La velocidad de estirado varía inversamente al espesor de acuerdo a la expresión :

$$Vd^n = k$$

siendo V la velocidad de estirado, d el espesor de la lámina y k una constante propia de cada instalación. Para un espesor de 3 mm, la velocidad se mantiene en el rango 90-120 m/h.

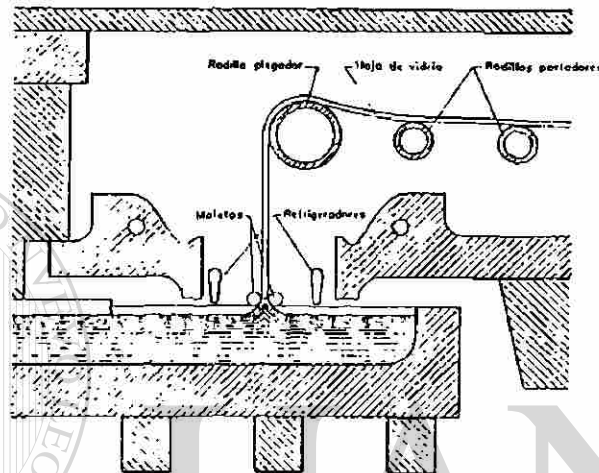


Figura 2. Sistema Colburn-Libbey-Owens de estirado de vidrio plano.

El procedimiento Libbey-Owens permite la obtención de un amplio rango de espesores (incluyendo menores a 1 mm) con un rendimiento elevado. Sin embargo, las numerosas complicaciones mecánicas y el delicado mantenimiento de la instalación han hecho caer en desuso este procedimiento y apenas se emplea en la actualidad.

SISTEMA FOURCAULT

En este sistema, la hoja de vidrio emerge del baño a través de la rendija de una pieza alargada de material refractario, llamada distribuidor, el cual se encuentra parcialmente sumergido en el vidrio, figura 3. Por efecto de la presión hidrostática que ejerce el vidrio fundido, éste penetra por la rendija formando una cresta que sirve de arranque a la hoja plástica.

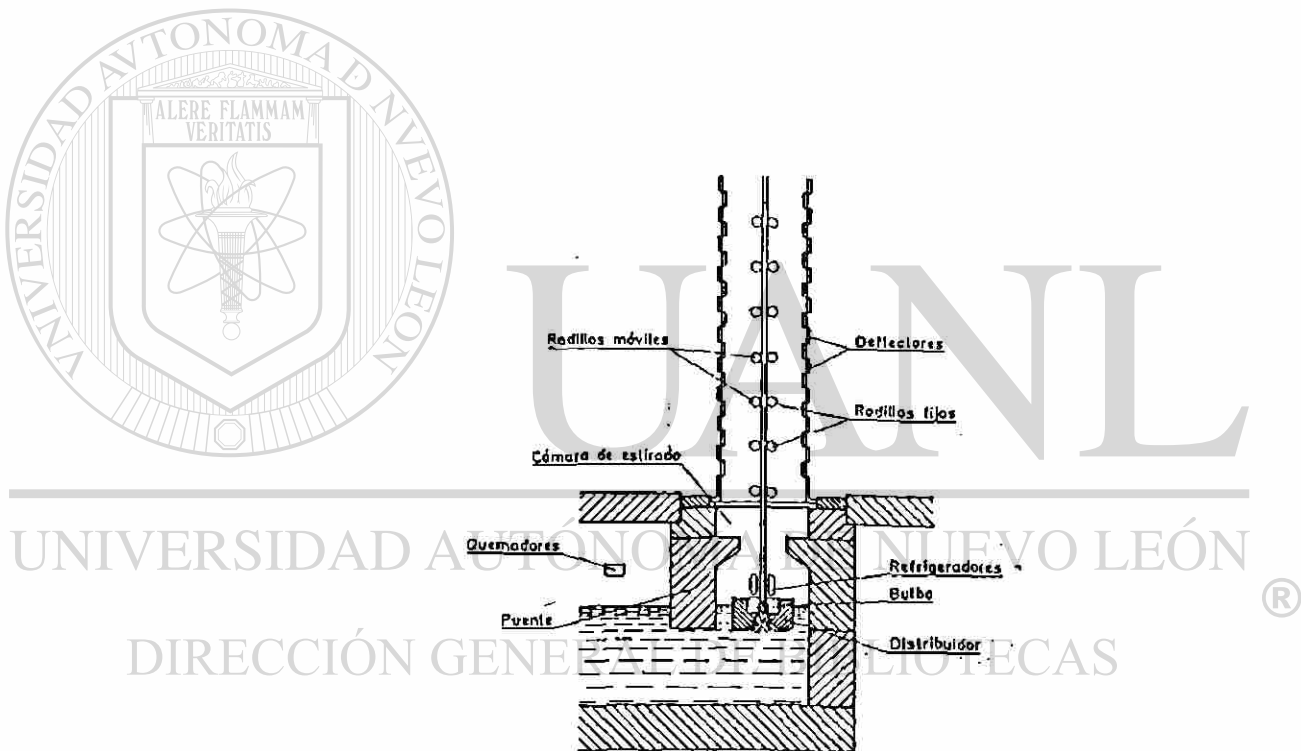


Figura 3. Sistema Fourcault de estirado de vidrio plano.

El estirado se inicia mediante un bastidor metálico especial que se sumerge en el vidrio fundido. La lámina de vidrio se enfría lateralmente mediante dos cilindros refrigerantes con el fin de evitar la retracción transversal y así mantener su espesor. El avance de la lámina de vidrio transcurre verticalmente en todo su recorrido a lo largo de la cámara de estirado, donde se eleva mediante varios juegos de rodillos de acero protegidos con asbesto. En su recorrido ascendente, la lámina se recoce lenta y gradualmente desde 950°C (temperatura al momento de su extracción) hasta unos 100 °C. Cuando el borde libre de la lámina alcanza una determinada altura, se efectúa el corte de la hoja manual o mecánicamente. El espesor de la lámina de vidrio puede modificarse variando la velocidad de estirado, la cual depende de la viscosidad y temperaturas en el rango 900-950 °C. Un defecto relativamente frecuente del vidrio estirado verticalmente es la aparición de finas cuerdas o estrías en la dirección del estirado que alteran su calidad y que son debidas al efecto contaminante que resulta de la disolución lenta del material refractario del distribuidor, favorecida por la continua abrasión del vidrio fundido.

SISTEMA PITTSBURGH

Este procedimiento tiene en común con el Fourcault el sistema de estirado, pero en lugar del distribuidor existe una pieza de material refractario (barra de estirado) totalmente sumergida en el vidrio a unos 70 mm debajo de su nivel y situada inmediatamente debajo de la línea de estirado, figura 4.

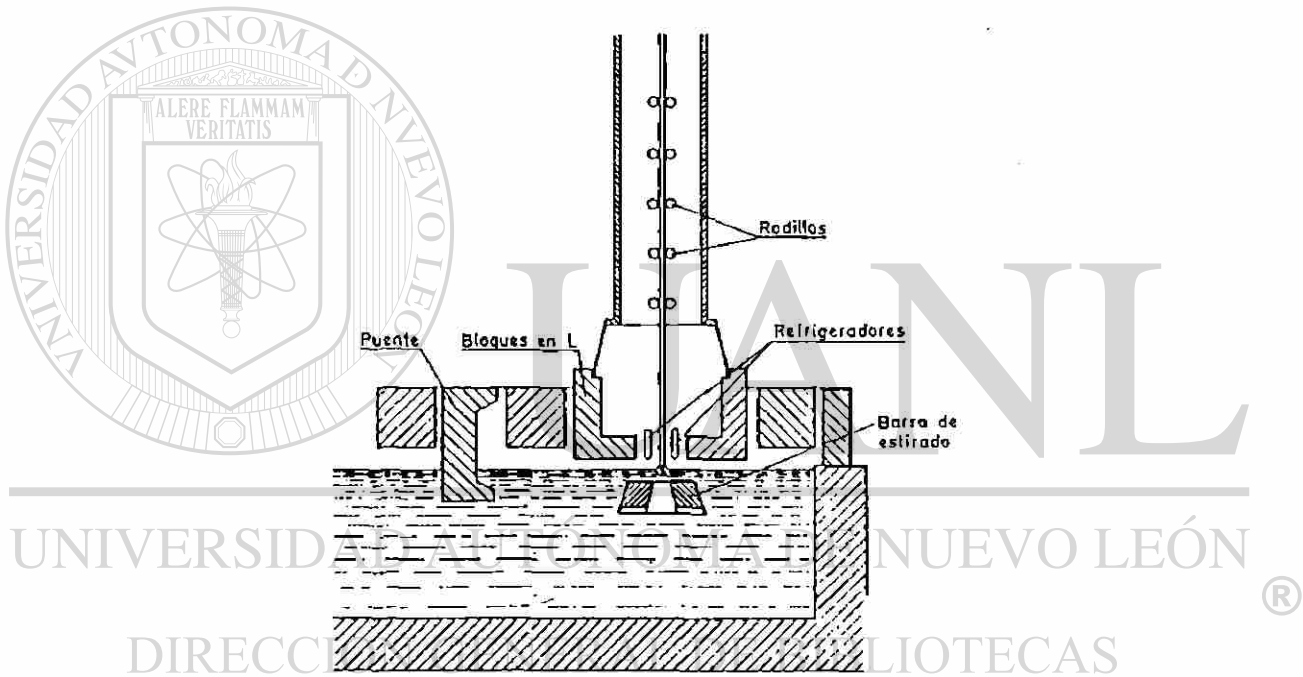


Figura 4. Sistema Pittsburgh de estirado de vidrio plano.

Esta pieza actúa como pantalla térmica que protege a la hoja de vidrio en su inicio además de que lo mantiene a una temperatura más elevada, reduciendo así el riesgo de devitrificación.

De los tres procedimientos de estirado descritos, éste es el que proporciona mejor calidad y más alto rendimiento. La mayor temperatura de trabajo, además de favorecer la homogeneidad del vidrio y de disminuir su tendencia a devitrificar, permite disminuir apreciablemente la proporción de álcali en su composición y por consiguiente mejorar su estabilidad química y mecánica.

PROCEDIMIENTO DE LAMINADO CONTINUO

La figura 5 muestra el sistema Boudin de colado continuo, donde el vidrio fundido, una vez afinado, pasa a la zona de acondicionamiento térmico y después al exterior a través de rodillos de laminación.

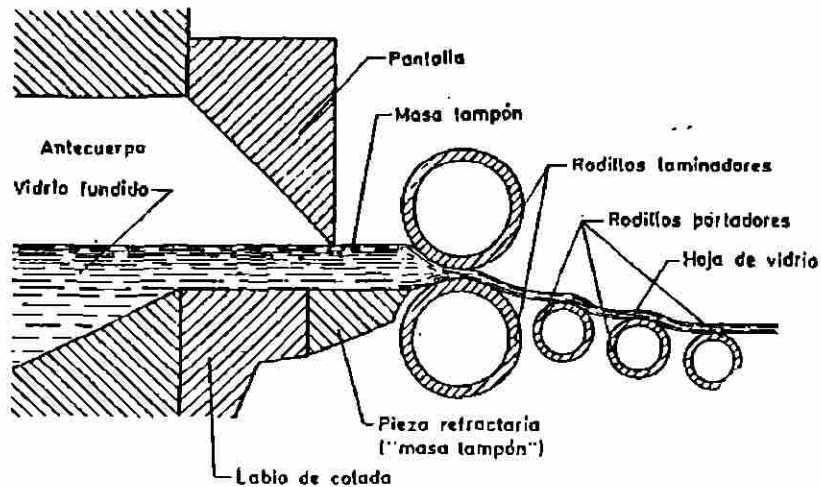


Figura 5. Procedimiento Boudin de colado continuo

Una vez formadas las láminas, se procede al recocido y enfriamiento respectivos.

PROCEDIMIENTO DE FLOTADO

En el año de 1959 y tras un gran esfuerzo tecnológico, la firma británica Pilkington Brothers dió a conocer un nuevo procedimiento de fabricación de vidrio plano que había de constituir una auténtica revolución industrial de este sector. Esquemáticamente el proceso de trabajo es el siguiente. El vidrio se funde en un horno de grandes dimensiones y después de afinado y acondicionado se le hace caer por rebosamiento entre dos rodillos laminadores o bien sobre un canal situado a la salida del horno, formando una lámina continua que después de enfriada hasta unos 1150 °C , penetra en una cámara donde transcurre la etapa principal de todo el proceso . La lámina de vidrio se recibe

dentro de esta cámara sobre un baño de estaño fundido de unos 30 cm de profundidad y flotando sobre él se extiende y avanza horizontalmente. Al salir de esta cámara pasa por un túnel largo de recocido y finalmente se corta, figura 6.

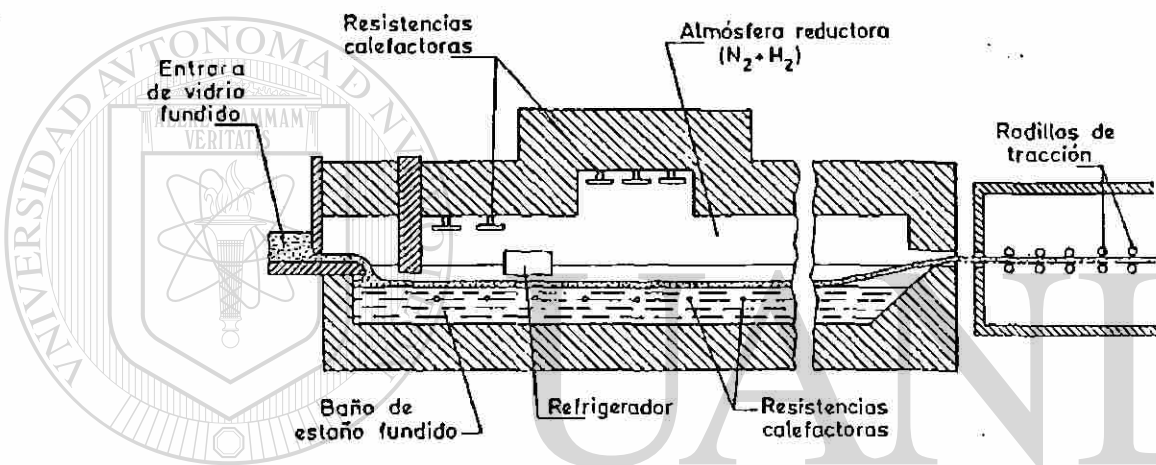


Figura 6. Procedimiento de fabricación de vidrio plano flotado.

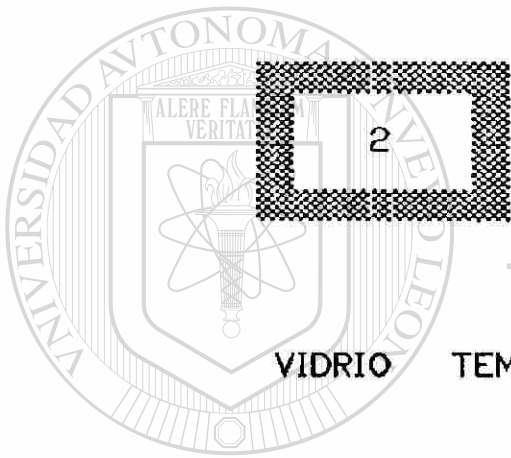
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La aportación importante y original de este procedimiento radica en la posibilidad de obtener directamente una lámina de vidrio pulida por ambas caras, sin necesidad de ser sometida a ninguna operación posterior de desbaste y pulido. El vidrio adquiere por su cara superior un pulido a fuego mientras que por la cara inferior recibe el pulido especular que le comunica la superficie libre del baño de estaño fundido sobre el que se

desliza. Para proteger a éste de su oxidación es preciso mantener en la cámara una atmósfera reductora, lo cual se consigue haciendo pasar una corriente de nitrógeno con un 0.5% de hidrógeno. El baño de estaño está dividido en varias zonas calentadas eléctricamente a temperaturas diferentes rigurosamente controladas. En la primera zona, mantenida a unos 1020°C el vidrio se extiende sobre el baño metálico. De acuerdo a su densidad y su tensión superficial cada vidrio alcanza un espesor determinado. Para un vidrio sódico-cálcico ordinario este espesor es de 6.3 mm.

El vidrio pasa después a una segunda zona en la que, mediante un sistema de refrigeración se enfría hasta unos 700 °C. En la tercera zona se vuelve a calentar a 850°C adquiriendo el pulido a fuego y su espesor definitivo. A continuación se hace descender nuevamente su temperatura hasta 650°C y finalmente abandona el baño de estaño para pasar al túnel de recocido.

Las principales ventajas de este proceso de fabricación son las elevadas velocidades de extracción que se pueden alcanzar (para un vidrio de 6 mm llegan a ser de 240 m/h) además de una elevada calidad en el producto.



VIDRIO

TEMPLADO

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

2.1 TEMPLADO DEL VIDRIO PLANO

INTRODUCCION

Como se observa con frecuencia, el vidrio plano puede fracturarse al aplicársele cargas mecánicas ligeras como las generadas por impacto, presión o choque térmico. Los fragmentos de vidrio puntiagudos pueden causar serias lesiones, figura 1. Un tratamiento especial da origen a un vidrio menos susceptible a la fractura y reduce considerablemente el riesgo de lesiones. A este producto se le conoce como cristal de seguridad.

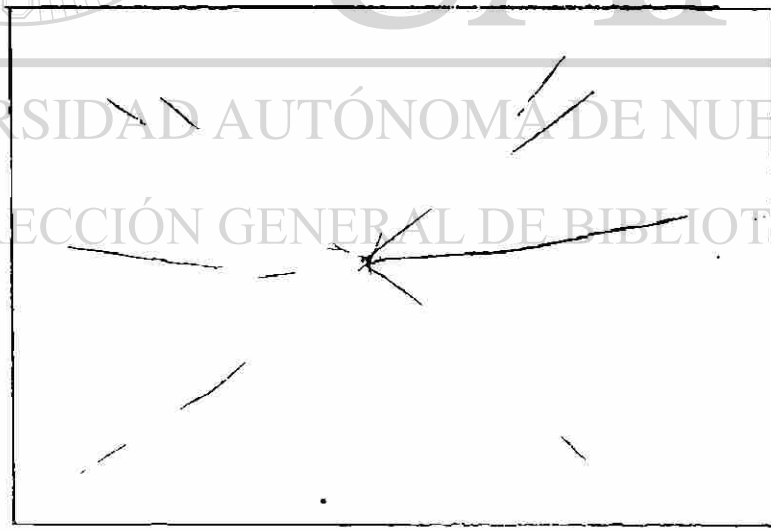


Figura 1. Patrón de fractura de un vidrio plano normal

Durante la producción de vidrio de seguridad, vidrio plano cortado es suspendido verticalmente u horizontalmente en el sistema de manufactura donde se calienta en forma rápida hasta aproximadamente 150 °C por encima de la temperatura de transformación e inmediatamente es templado con aire frío. Como resultado de este proceso de templado, la masa interna de vidrio se enfría más lentamente que la superficie externa, produciendo en esta esfuerzos de compresión en el rango 70 - 140 Mpa como lo muestra la figura siguiente :

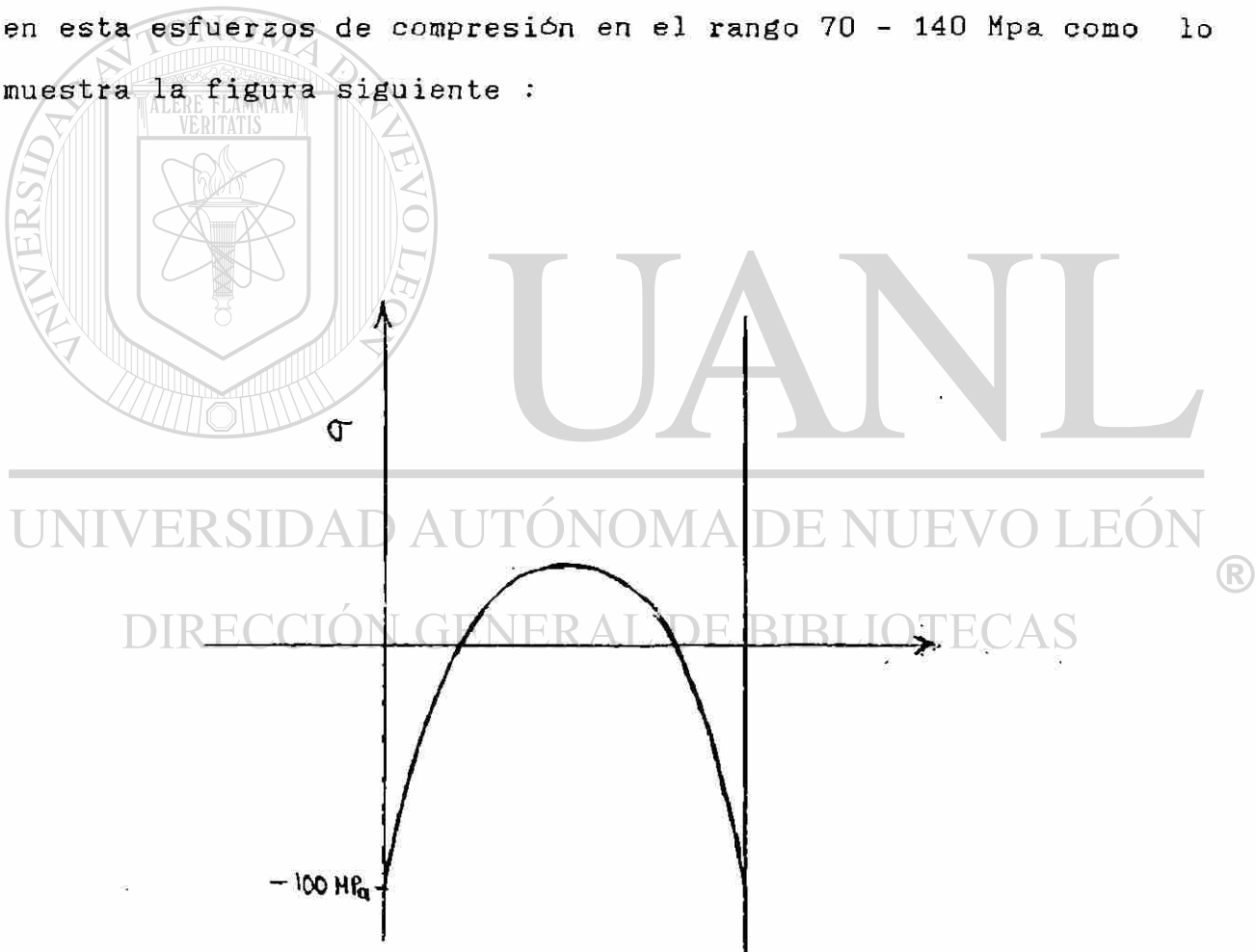


Figura 2. Magnitud y distribución de esfuerzos residuales en el vidrio templado.

El producto obtenido mediante este proceso es llamado vidrio templado o cristal monolítico de seguridad. Los principales factores que afectan la magnitud de los esfuerzos residuales son la expansión térmica del vidrio a temperaturas superiores e inferiores de la temperatura de transformación (T_g), su módulo de elasticidad y la diferencia de temperaturas arriba de T_g que exista entre las superficies con respecto a la masa interna de vidrio. Los esfuerzos compresivos obtenidos son aproximadamente 3-4 veces la resistencia "normal" del vidrio plano, y estos aumentan con el espesor del vidrio. Cuando el vidrio templado es sometido a impacto (como cuando una piedra golpea un cristal de un automóvil o en un accidente automovilístico) este se fractura en trozos muy pequeños de forma regular y sin picos, figura 3, cuyo tamaño puede controlarse en el proceso de templado.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

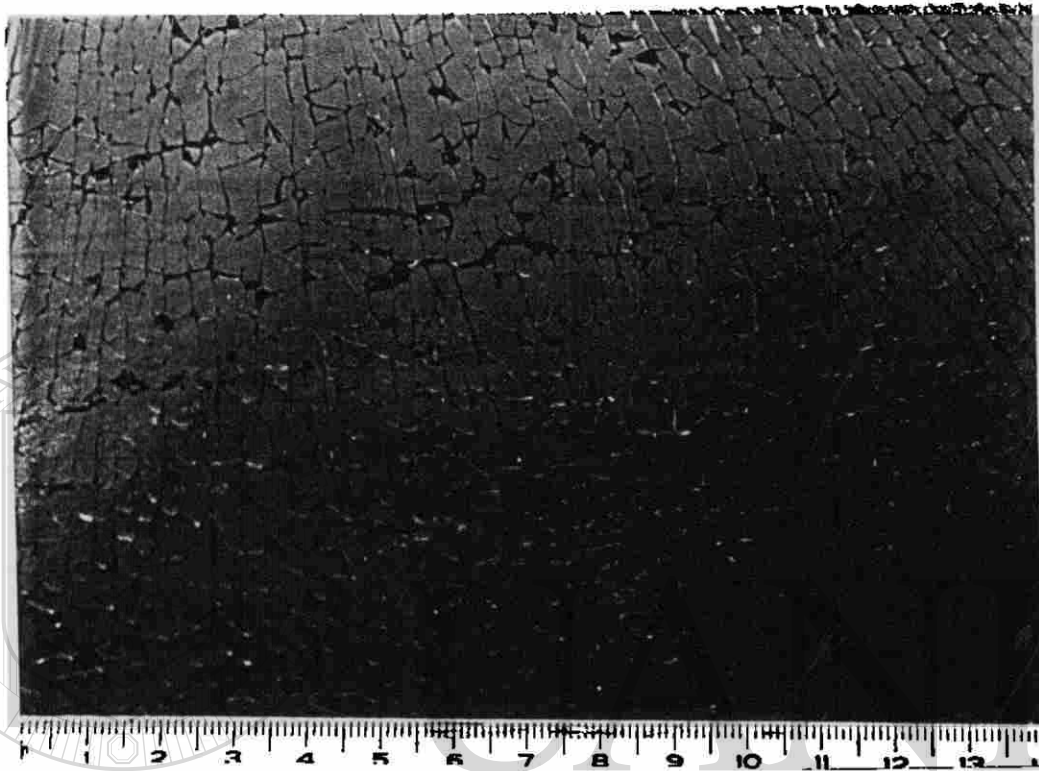


Figura 3. Patrón de fractura de un vidrio templado.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Todos los vidrios planos pueden ser templados, recientemente la industria automotriz utiliza vidrios flotados templados. Los vidrios monolíticos de seguridad y otros productos son producidos por las mismas compañías de vidrio plano.

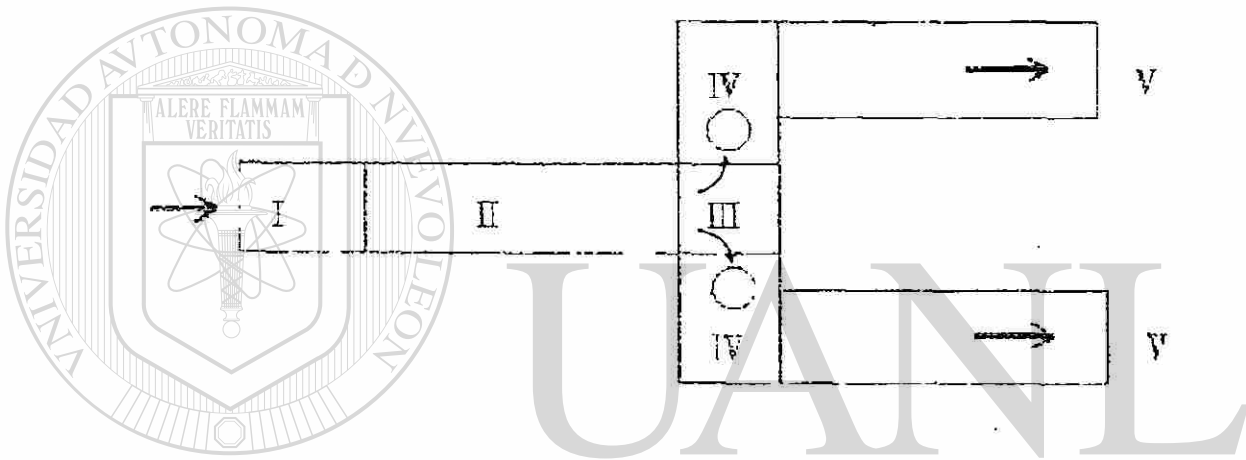
22 MANUFACTURA DE CRISTAL AUTOMOTRIZ

Como se mencionó anteriormente, el cristal automotriz es producido a partir de vidrio plano flotado, el cual se somete al siguiente proceso :

- a) CORTE según forma final del producto.
- b) BARRENADO si es necesario.
- c) PULIDO DE LOS BORDES.
- d) LAVADO
- e) PINTADO si se requiere.
- f) TEMPLADO
- g) INSPECCION Y EMPAQUE.

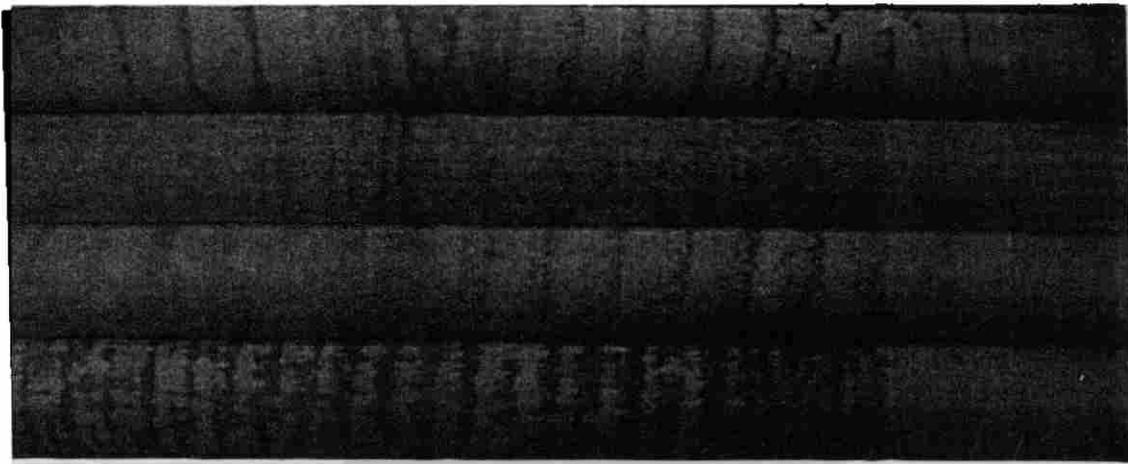
La figura 4 muestra esquemáticamente la línea de templado. El vidrio plano cortado, pulido, lavado y pintado es transportado horizontalmente a través de un horno de resistencias eléctricas mediante rodillos de sílica de alta pureza, figura 5, y calentados a una temperatura final de alrededor de 686 °C. En la parte final del horno, el vidrio se curva por gravedad según los requerimientos del producto final y después es templado en cuestión de segundos con aire a temperatura ambiente. Posteriormente es transportado a la zona de inspección y empaque.

Dentro del horno de calentamiento del cristal se tienen dos líneas de inyección de SO_2 , el cual actúa como lubricante entre los rodillos transportadores y el vidrio a templar y como desalcalinizante de la superficie con lo cual se tiene un aumento en la resistencia química. Más adelante se verá en forma más amplia el papel que juega el SO_2 en el proceso de manufactura del vidrio templado.



- I CARGA DE VIDRIO PLANO CORTADO, PULIDO, LAVADO Y PINTADO.
- II CALENTAMIENTO EN HORNO DE RESISTENCIAS ELECTRICAS, TRANSPORTACION MEDIANTE RODILLOS DE SILICA, INYECCION DE SO_2 .
- III CURVADO DEL CRISTAL A 685 C.
- IV TEMPLADO DEL CRISTAL MEDIANTE AIRE A TEMPERATURA AMBIENTE.
- V INSPECCION Y EMPAQUE.

Figura 4. Representación esquemática de una línea de templado de cristal automatizada.



Rodillos después de operación

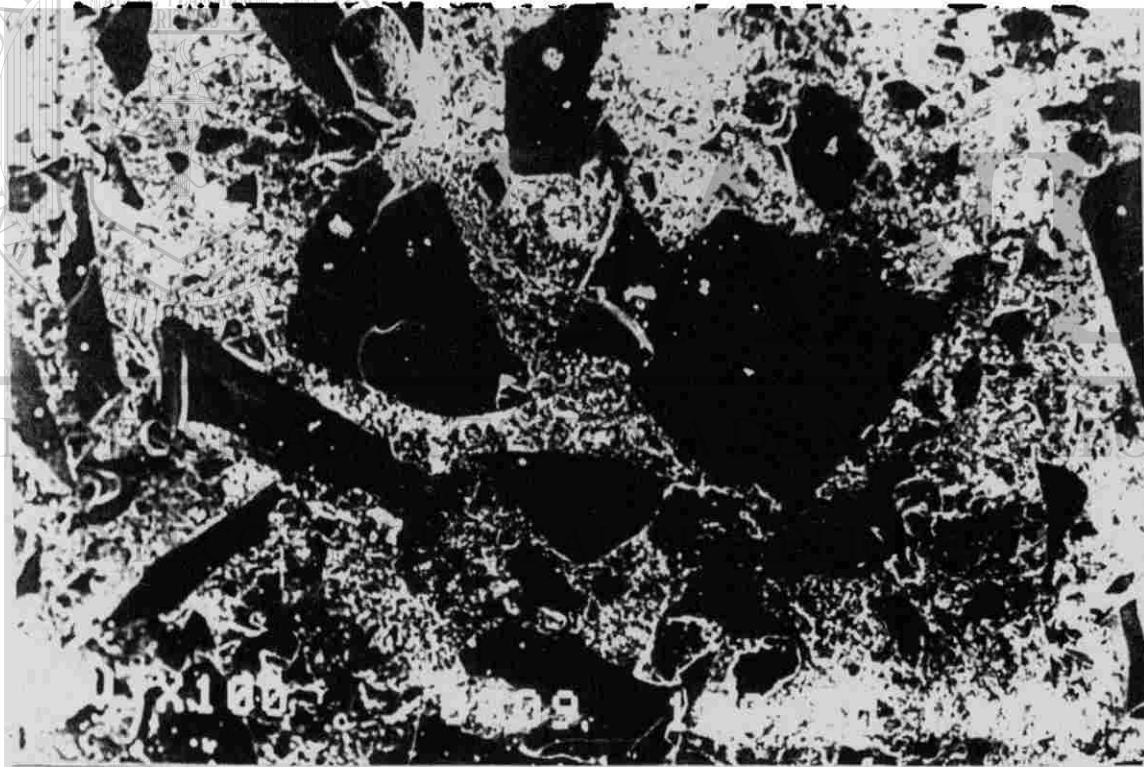
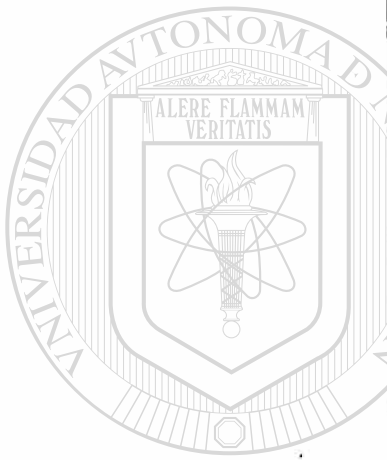
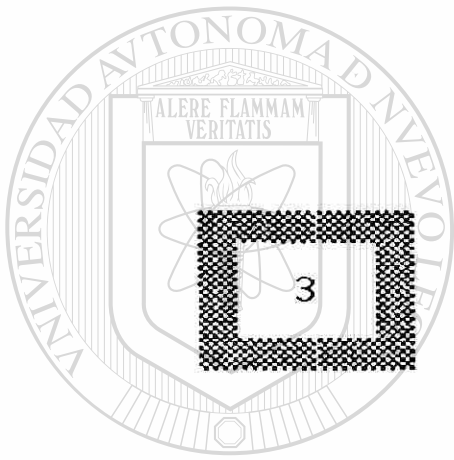


Imagen de la fractura interna de un rodillo x 100

Figura 5. Rodillos de sílica, medio de transportación de vidrio en el horno de templado.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Figura 6. Análisis elemental del rodillo
mostrado en la figura 5, solo
se detecta Si.
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

TERMOELASTOPLASTICIDAD APLICADA A LA DETERMINACIÓN DE
ESFUERZOS RESIDUALES EN EL VIDRIO TEMPLADO

®

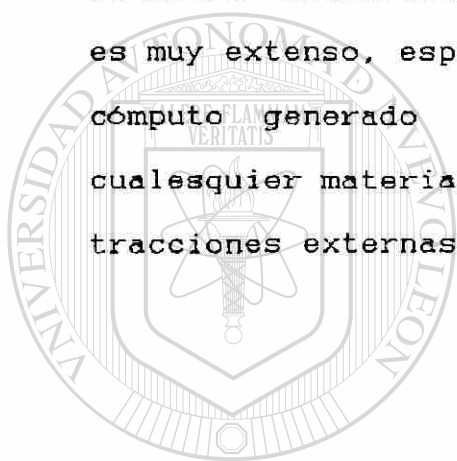
3.1 INTRODUCCION

La determinación de esfuerzos residuales durante los diversos procesos de formado de materiales es un problema de gran importancia tanto teórica como práctica. El medir esfuerzos residuales es inherentemente complicado, y contar con modelos matemáticos y paquetes de cómputo para predecir los esfuerzos simulando diversas condiciones de formado es de gran importancia en aplicaciones industriales.

Los tratamientos matemáticos a la fecha¹ son de tipo semi-empíricos y su exactitud se restringe sólo a aquellos que se ajustan estrictamente a las condiciones en las que se estableció el modelo empírico de fluencia. En el presente tratamiento se parte de principios fundamentales de las teorías de elasticidad y plasticidad, ampliamente verificadas por la experiencia, y a través del concepto matemático de termoelastoplasticidad desarrollado por Lardner y otros² se genera un modelo de elegancia matemática intrínseca, el cual se aplica a la solución del problema general de termoelastoplasticidad. Como ejemplos de su aplicación se muestran las soluciones matemáticas exactas encontradas para cilindros axisimétricos y planos infinitos, obteniéndose además algunas curvas y resultados numéricos relevantes a los procesos de formado de vidrio.

Estas soluciones son utilizadas para modelar el templado de vidrio plano. Los resultados obtenidos corresponden a las curvas de evolución espacial y temporal de los esfuerzos térmicos, residuales y totales que se generan durante la historia térmica correspondiente la templado por aire forzado.

La discusión de los resultados se limita a las conclusiones más importantes, pero la cantidad de información que proporciona el modelo matemático y su correspondiente modelo en computadora es muy extenso, especialmente si se considera que el paquete de cómputo generado a través del modelo se puede extender a cualesquier material y a cualesquier historia térmica y de tracciones externas aplicadas.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

3.2 FORMULACION GENERAL DEL PROBLEMA TERMOELASTOPLASTICO

Considérese un material homogéneo e isotrópico de módulo de Young E , razón de Poisson ν , coeficiente de dilatación α , y sea $T(r;t)$ su temperatura en el punto de coordenadas r al tiempo t , u su campo vectorial de desplazamientos elásticos, e_{ij} su tensor de deformación, σ_{ij} su tensor de esfuerzos, ρ su densidad y sea F el campo vectorial de fuerzas de cuerpo por unidad de masa al que está sujeto el material. Con esta notación y la que se emplea en

tensores se tiene que

$$e_{ij}^{TOTAL} = \frac{1}{2} (U_{ij} + U_{ji}) = e_{ij}^{ELASTICA} + e_{ij}^{TERMICA} + e_{ij}^{PLASTICA}, \quad (1)$$

donde la deformación elástica está dada por

$$e_{ij}^{ELASTICA} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij}, \quad (2)$$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

en la que δ_{ij} es la delta de Kronecker ($=1$ si $i=j$, y a cero si i es diferente de j) y σ_{kk} denota la traza del tensor de esfuerzos.

La deformación térmica está dada por

$$e_{ij}^{TERMICA} = \alpha T(r;t) \delta_{ij} \quad (3)$$

y de acuerdo al criterio de Prandtl-Reuss la deformación plástica se determina como

$$\frac{\partial e}{\partial t} \overset{\text{PLASTICA}}{e}_{ij} = \frac{3}{2} e_c^p(\sigma_e, T) \frac{S_{ij}}{\sigma_e} \quad (4)$$

donde e_c^p es la velocidad de deformación plástica en un sistema uniaxial a la temperatura T sujeto a un esfuerzo equivalente

$$\sigma_e = \left(\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij} \right)^{1/2} \quad (5)$$

en la que S_{ij} es el deviatorico del tensor de esfuerzos ,

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (6)$$

De la ecuación de equilibrio

$$\sigma_{ij,j} + \rho F_i = 0 \quad (7)$$

y definiendo el tensor de incompatibilidad

$$\eta = -\text{Inc}(e) = -\nabla \times e \times \nabla \quad , \text{ i.e.} \quad (8)$$

$$\eta_{il} = -\epsilon_{ijk} \epsilon_{lmn} \epsilon_{kn,jm} \quad (9)$$

donde ϵ_{ijk} es el factor de permutación usual en el producto

vectorial, se tiene que

$$\eta_{ij}^{\text{ELASTICA}} = \frac{1+\nu}{E} \nabla^2 \sigma_{ij} - \frac{1}{E} \left(\nabla^2 \sigma_{kk} \delta_{ij} - \sigma_{kk,ij} \right) + \dots$$

$$\dots + \frac{1+\nu}{E} \rho \left(F_{i,j} + F_{j,i} - F_{k,k} \delta_{ij} \right), \quad (10)$$

$$\eta_i^{\text{TERMICA}} = -\alpha \left(\nabla^2 T \delta_{ij} - T_{,ij} \right), \quad (11)$$

$$\eta_{ij}^{\text{PLASTICA}} = \nabla^2 e_{ij}^p + e_{kn,kn}^p \delta_{ij} - e_{ij,jk}^p - e_{jk,ik}^p, \quad (12)$$

$$\eta^{\text{TOTAL}} = \eta^{\text{ELASTICA}} + \eta^{\text{TERMICA}} + \eta^{\text{PLASTICA}} = 0. \quad (13)$$

La ecuación anterior establece la ecuación diferencial del problema termoelastoplástico general. Aplicaciones de la formulación anterior son relevantes en muchos campos de ciencia e ingeniería y serán desarrollados en trabajos posteriores, aquí se limitará al caso específico de cilindros axisimétricos y planos infinitos.

3.3 APLICACION A CILINDROS AXISIMETRICOS

Considérese un cilindro axisimétrico de radio interior a y de radio exterior b , sujeto a un esfuerzo $\sigma_r(a)$ en su interior y $\sigma_r(b)$ en su exterior con una tensión axial promedio $\bar{\sigma}_z$, y una historia térmica $T(r;t)$. Bajo estas condiciones se tiene

$$e_r = \frac{\partial U_r}{\partial r} = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu (\sigma_\theta + \sigma_z)) + \alpha T + e_r^p, \quad (14)$$

$$e_\theta = \frac{U_r}{r} = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu (\sigma_r + \sigma_z)) + \alpha T + e_\theta^p, \quad (15)$$

$$e_z = \beta(t) = \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu (\sigma_r + \sigma_\theta)) + \alpha T + e_z^p, \quad (16)$$

por lo que la ecuación de compatibilidad se reduce a

$$e_r = \frac{\partial}{\partial r} (r e_\theta). \quad (17)$$

Usando la ecuación de equilibrio en coordenadas cilíndricas

$$\sigma_\theta = \frac{\partial}{\partial r} (r \sigma_r) \quad (18)$$

se obtiene

$$\sigma_r(r) = \frac{a^2}{r^2} \sigma_r(a) + \frac{b^2 \sigma_r(b) - a^2 \sigma_r(a)}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \dots$$

$$\dots + \frac{1}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) I(b, b^2) - \frac{I(r, r^2)}{r^2}, \quad (19)$$

$$\sigma_\theta(r) = -\frac{a^2}{r^2} \sigma_\theta(a) + \frac{b^2 \sigma_\theta(b) - a^2 \sigma_\theta(a)}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + \dots$$

$$\dots + \frac{\alpha ET}{1-\nu} - \frac{E}{1+\nu} e_\theta^p + \frac{\nu E}{1-\nu} e_r^p + \dots$$

$$\dots + \frac{1}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) I(b, b^2) - \frac{I(r, r^2)}{r^2}, \quad (20)$$

$$\sigma_z(r) = \frac{\alpha ET}{1-\nu} - \frac{E}{1+\nu} e_\theta^p + \frac{E}{1-\nu} e_r^p + J, \quad (21)$$

donde

$$I(\lambda, \xi) = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \int_a^\lambda \left(2(1+\nu) \alpha T(x; t) + \frac{\xi}{x} (e_\theta^p - e_r^p) - \dots \right) dx \quad (22)$$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$\dots - (1-2\nu) e_z^p \times dx, \quad (22)$$

$$J = \frac{E}{(1-\nu^2)(b^2 - a^2)} \int_a^b \left(2(1+\nu) \alpha T(x; t) + \dots \right) dx$$

$$\dots + \left(\frac{b^2(\nu-1) + a^2}{x^2} \right) (e_\theta^p - e_r^p) - (2-\nu)(e_\theta^p + e_r^p) \times dx \quad (23)$$

El estado transiente de esfuerzos y los esfuerzos residuales se obtienen a través de una integración numérica en el tiempo. Para un material viscoelástico como el vidrio

$$\dot{P} e_c = \frac{\sigma_\theta}{3\mu} \quad (25)$$

donde μ representa la viscosidad del material, entonces

$$\dot{P} e_{ij} = \frac{S_{ij}}{2\mu} \quad (26)$$

para un cilindro de vidrio soda-calcio de parámetros físicos

$$E = 6.7 \times 10^{10} \text{ Pa.}$$

$$\nu = 0.22,$$

$$\alpha = (52 + 0.015 T \cdot C) \times 10^{-7}, \quad (K^{-1}),$$

$$\log_{10} \mu = -4.726 + \frac{6671.9}{T - 107 \cdot C}, \quad \mu \text{ en Pa seg.},$$

$$a = 0.06 \text{ mts.}$$

$$b = 0.063 \text{ mts.}$$

con condiciones a la frontera $\sigma_r(a) = \sigma_r(b) = 0$, y sujeto a la historia térmica marcada en la figura 1, la cual se obtuvo de la solución exacta del problema de extracción de calor por medio convectivo⁴, los esfuerzos generados durante el enfriamiento resultan compresivos en la superficie interior y exterior del cilindro y en la parte interna se generan esfuerzos de tensión, tal como se muestra en las figuras 2,3. El esfuerzo σ_z es del mismo orden de magnitud que σ_θ y σ_r es del orden de un centésimo de σ_θ , ver figuras 2 y 4.

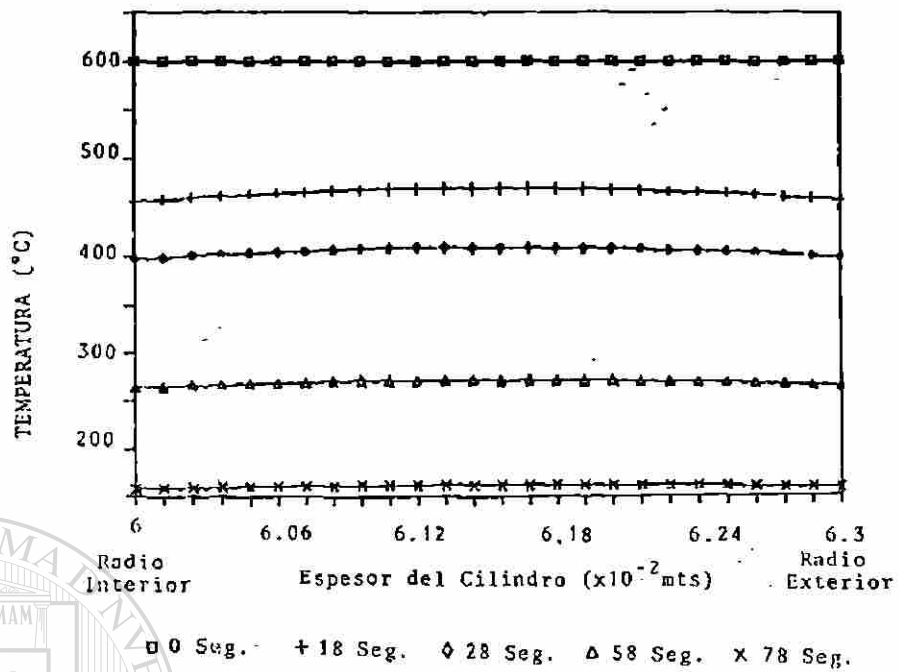


Figura 1. Historia Térmica

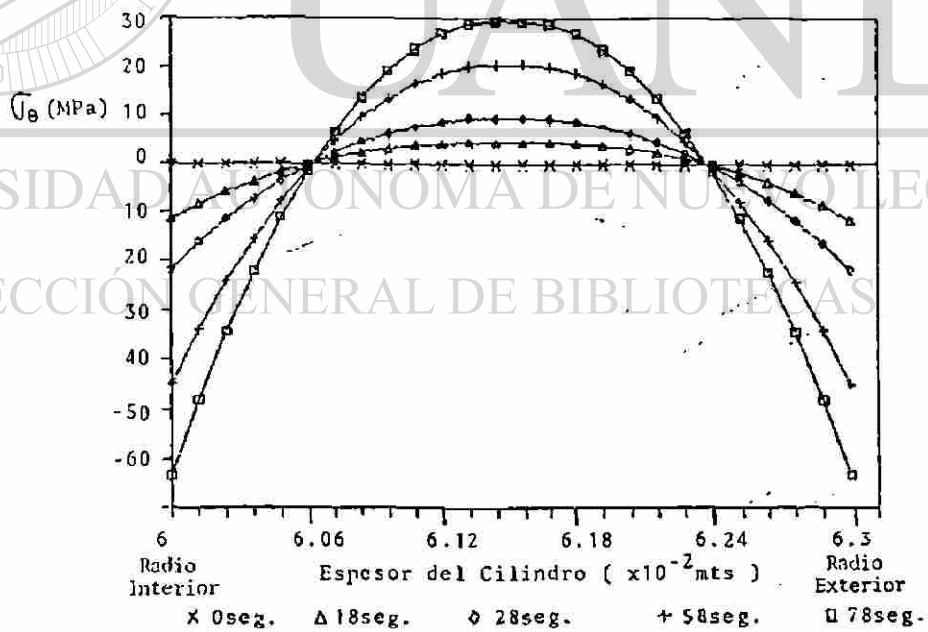


Figura 2. Evolución temporal de σ_θ

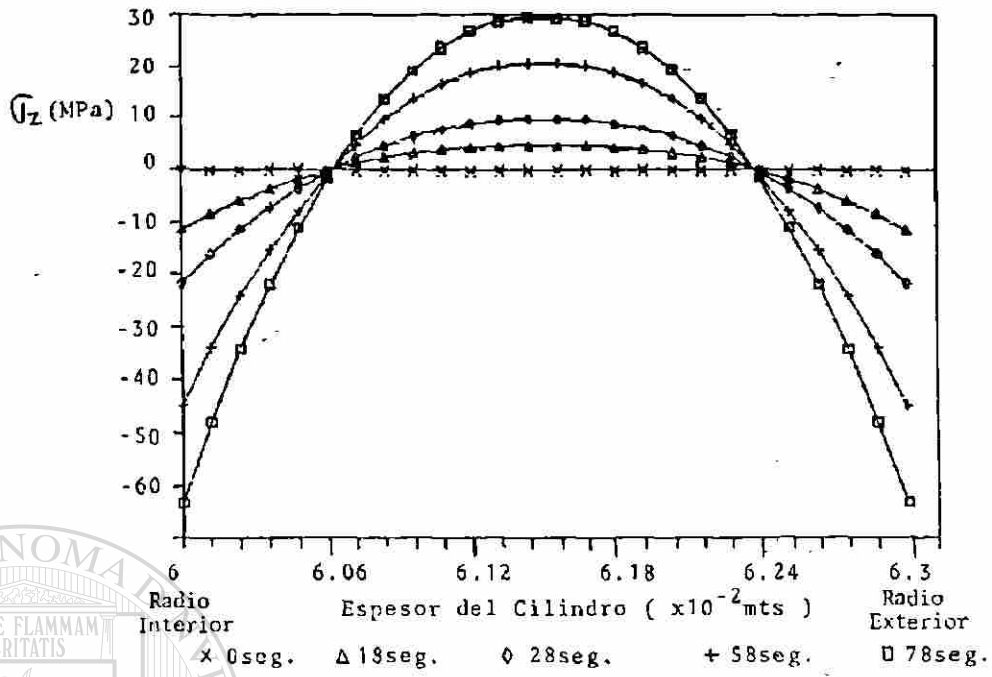


Figura 3. Evolución temporal de σ_z

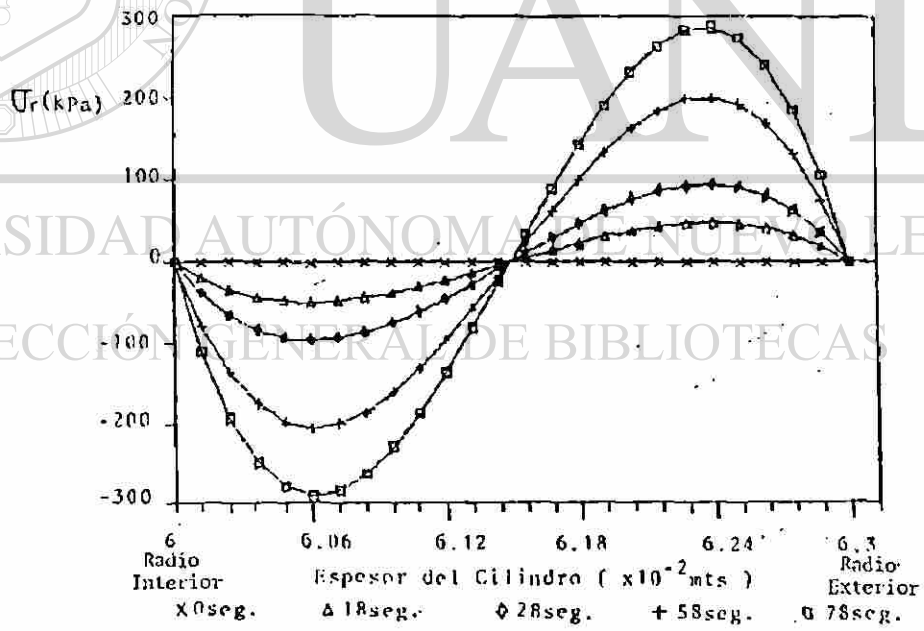


Figura 4. Evolución temporal de σ_r

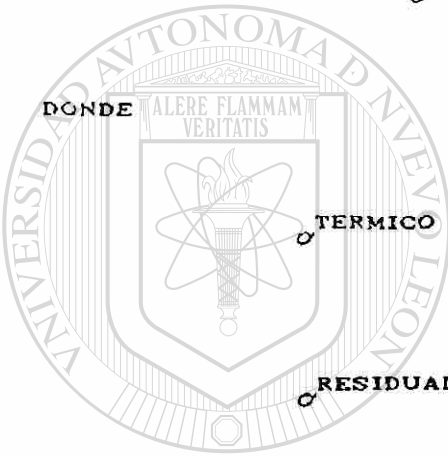
3.4 APLICACION AL TEMPLADO DE VIDRIO PLANO

Este sistema se puede modelar tomando $b-a = \varepsilon$ (espesor de la placa) y haciendo tender al infinito el radio interior del cilindro, de esta manera se obtiene

$$\sigma_r(r) = 0 \quad (27)$$

y

$$\sigma = \sigma_\theta(r) = \sigma_z(r) = \sigma(r)^{\text{TERMICO}} + \sigma(r)^{\text{RESIDUAL}} \quad (28)$$



$$\sigma^{\text{TERMICO}} = \frac{E}{1-\nu} \left(\frac{1}{\varepsilon} \int_0^\varepsilon \alpha T dx - \alpha T \right) \quad (29)$$

$$\sigma^{\text{RESIDUAL}} = \frac{E}{1-\nu} \left(\frac{1}{\varepsilon} \int_0^\varepsilon e_\theta^p dx - e_\theta^p \right) \quad (30)$$

Para este sistema de (4) y (6) se obtiene

$$e_\theta^p = \frac{\sigma_\theta(r)}{6\mu} \quad \text{DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS}$$

Aplicando esta solución a una placa de vidrio soda-calcio de iguales parámetros físicos que en el caso anterior, pero con espesor $\varepsilon = 0.003$ mts. y sujeta a la historia térmica de templado severo como se muestra en la figura 5 (obtenida de la solución exacta del problema térmico⁴) se obtiene la evolución de los esfuerzos residuales en el tiempo mostrados en la figura 6.

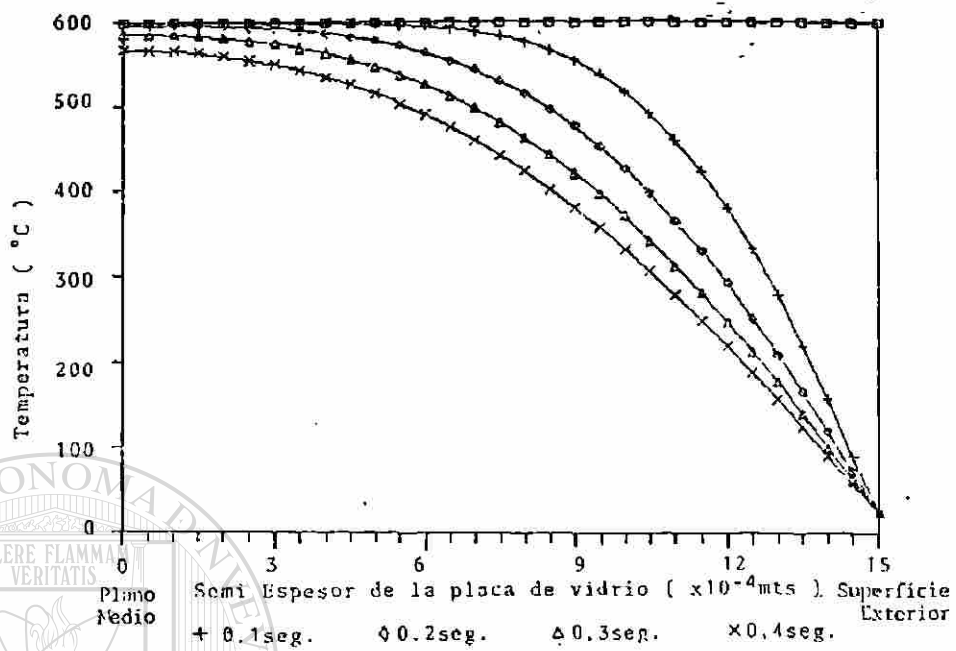


Figura 5. Historia térmica

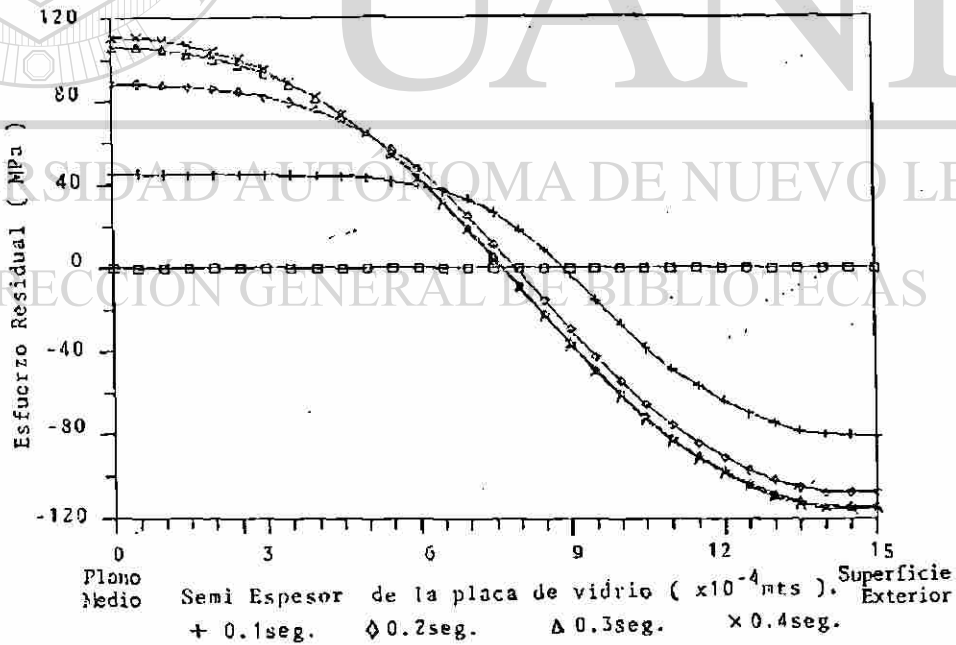


Figura 6. Evolución de los esfuerzos residuales.

Dichos esfuerzos resultan compresivos en la superficie externa y de tensión máxima en el plano medio. Estos esfuerzos dejan de evolucionar y se mantienen fijos a partir de 0.4 seg, ya que la viscosidad es tan alta por debajo de los 575 °c que no se permite deformación plástica subsecuente como se aprecia en la figura 7. En la figura 8 se muestra la evolución de los esfuerzos térmicos que se originan del gradiente de temperatura en la placa, resultando esfuerzos tensiles en la superficie exterior e interior, y compresivos en la parte interna.

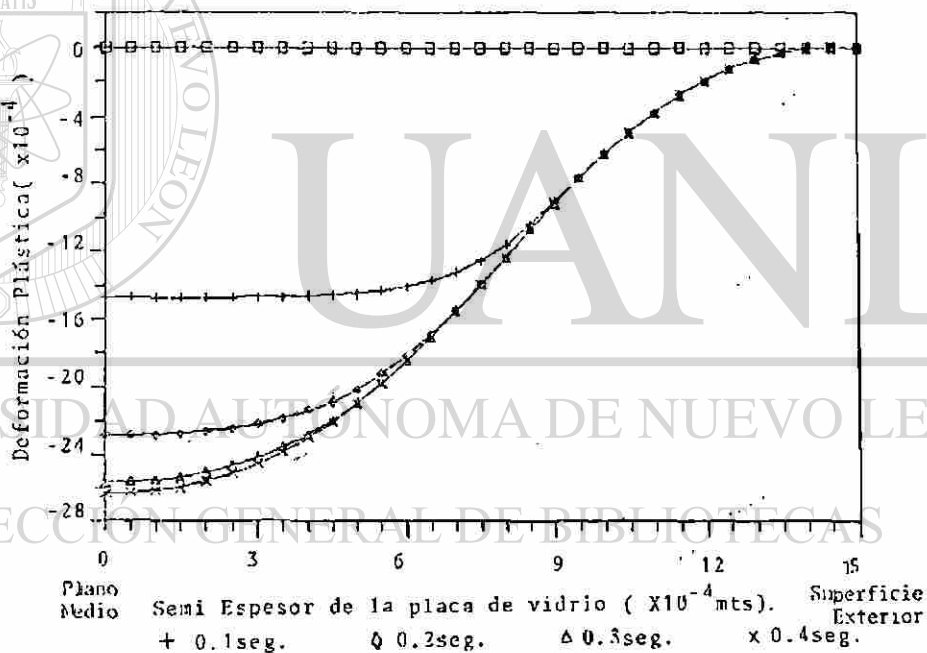


Figura 7. Evolución de la deformación plástica.

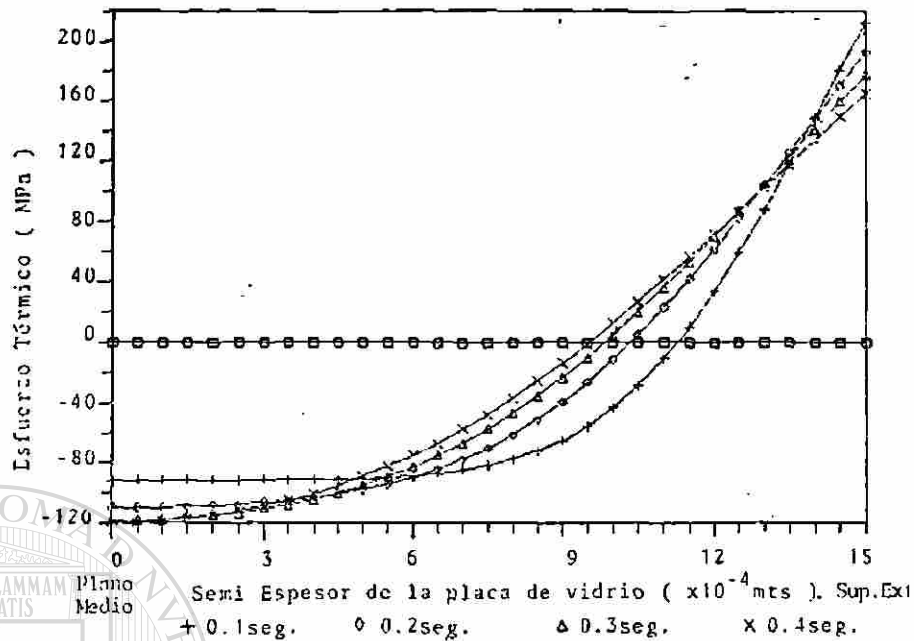


Figura 8. Evolución del esfuerzo térmico.

En la figura 9 se observa la evolución de los esfuerzos totales (residuales más térmicos), resultando tensiles en la superficie y compresivos en el interior de la placa. De comparar la evolución de los diferentes esfuerzos, se observa que la incompatibilidad plástica genera esfuerzos que tienden a disminuir el esfuerzo total, y por ende la energía elástica del sistema.

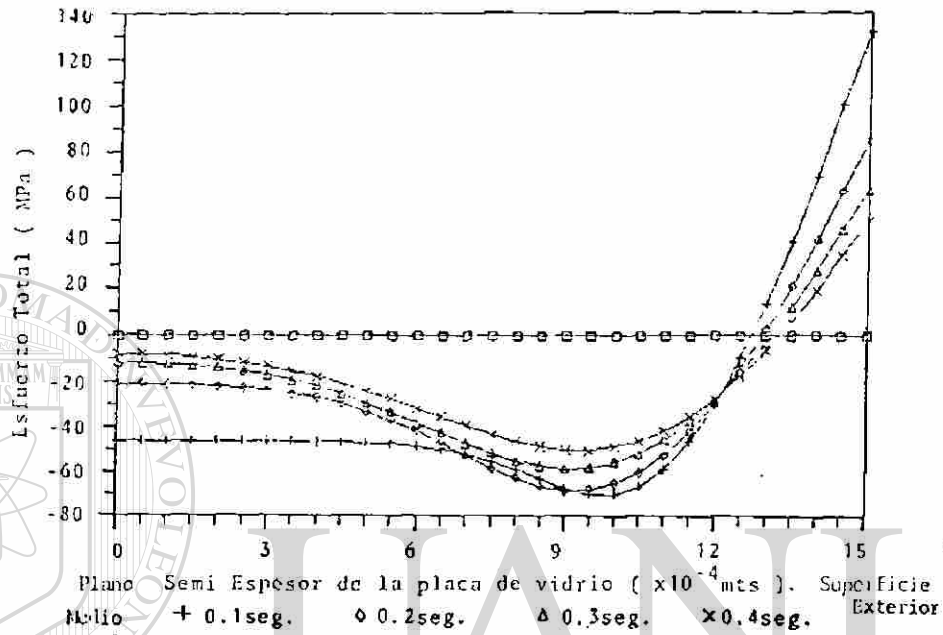
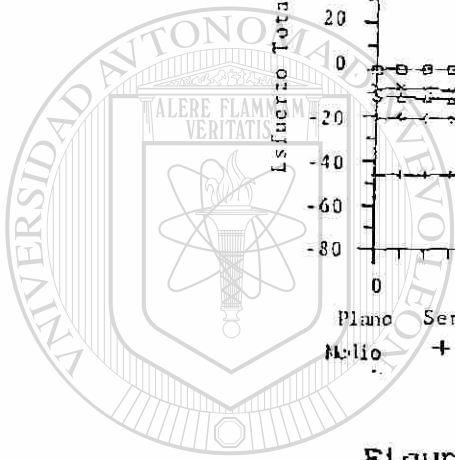


Figura 9. Evolución del esfuerzo total.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



3.5 CONCLUSIONES

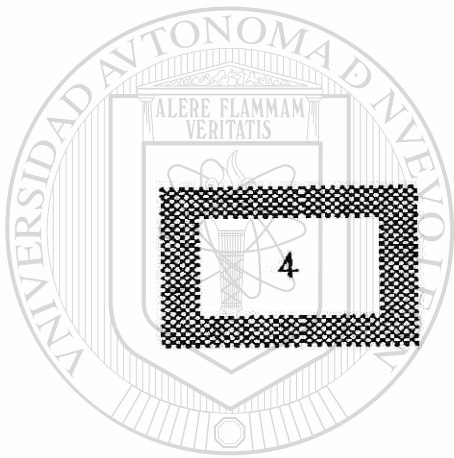
La teoría matemática de termoelastoplasticidad aquí presentada permite modelar los esfuerzos mecánicos, térmicos y residuales de los materiales sujetos a cualesquier sistema de formado. La teoría se ha aplicado con éxito a la determinación de la evolución de los esfuerzos originados durante el templado de vidrio plano.

De los resultados obtenidos se observa que los esfuerzos residuales aparecen debido a una deformación plástica no uniforme causada por los esfuerzos de origen térmico desarrollados en el material.

Los esfuerzos residuales son de sentido opuesto a los esfuerzos térmicos, es decir, de compresión máxima en la superficie exterior y de tensión en el centro de la placa, disminuyendo el esfuerzo total.

Cuando el templado se realiza a una temperatura ligeramente mayor a la de ablandamiento, los esfuerzos residuales generados no alcanzan a disminuir lo suficiente al esfuerzo total con lo que se origina fractura completa de vidrio.

Los esfuerzos residuales dejan de evolucionar cuando ya no existe deformación plástica debido a un aumento en la viscosidad originado por la disminución de la temperatura. Estos esfuerzos permanecen en el vidrio y provocan un aumento en su resistencia mecánica.



UANL

RAYABILIDAD DEL VIDRIO TEMPLADO : DIAGNOSTICO, ANALISIS
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN
Y SOLUCION DEL PROBLEMA
DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS



RAYABILIDAD DEL VIDRIO TEMPLADO : DIAGNÓSTICO, ANALISIS Y SÓLUCION DEL PROBLEMA.

4.1 ANTECEDENTES

La totalidad de la producción de vidrio templado de la empresa en la que se desarrolló el presente trabajo se destina al mercado internacional y éste demanda un estándar alto de calidad. En reunión sostenida el día 6 de Febrero de 1989, personal de Ingeniería de Manufactura de la empresa convino nuestra participación para investigar y solucionar el problema de Rayabilidad del Vidrio Templado. La susceptibilidad al rayado superficial que presentaban los cristales restaba calidad al producto peligrando su competitividad en el extranjero.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

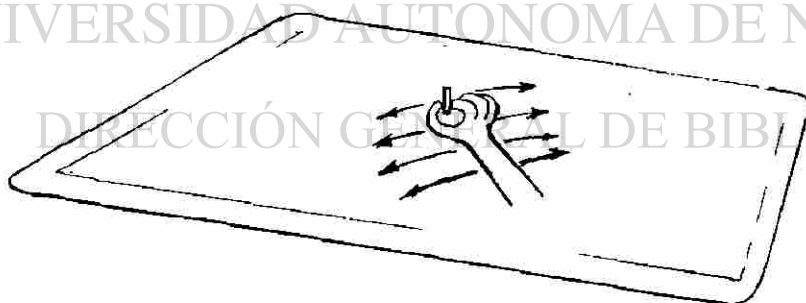
En la primera etapa del proyecto se realizó trabajo experimental a efecto de determinar las causas que originaban la debilidad superficial de los cristales y el mecanismo bajo el cual se dañaba la superficie. De esta manera se diagnosticó el problema y se estableció el criterio genérico para su solución.

Un resumen secuencial de las actividades realizadas para establecer el diagnóstico del problema y la implementación de las medidas preventivas se presenta a continuación.

4.2 CUANTIFICACION DE LA RAYABILIDAD

El problema de rayabilidad del vidrio templado consistía en la susceptibilidad a rayarse que presentaba la superficie inferior de los cristales producidos. Este fenómeno era cuantificado mediante una prueba de laboratorio (prueba de la rayabilidad) que se utilizaba como control de calidad. Se establecía un límite crítico en el grado de rayabilidad y si este se sobrepasaba durante las pruebas la producción era rechazada. La prueba se efectuaba como sigue :

- a) Se humedecía la superficie del vidrio a inspeccionar mediante una solución jabonosa.
- b) Mediante una navaja de un filo se barría transversalmente la superficie del cristal 50 veces como se indica en la figura.



- c) Observación en cuarto oscuro con luz transmitida.
- d) Conteo de rayas.
- e) Estadística.

4.3 DIAGNOSTICO

La primera prueba que se realizó sobre los vidrios templados fué un pulido químico de la superficie mediante una solución de HF (10% HF concentrado + 90% H₂O en volumen). Posterior a la prueba de la rayabilidad los cristales pulidos no presentaron rayas de ningún tipo, lo cual mostraba que el problema era totalmente superficial, descartando la posibilidad de una mala distribución en el perfil de los esfuerzos residuales.

Con base en lo anterior, la superficie de los cristales fué inspeccionada en detalle mediante microscopía óptica (MO). En la inspección se observó que en la cara inferior (en contacto con los rodillos de transportación el horno de templado) tenía un buen número de partículas incrustadas, figura 1, mientras que las caras superiores, figura 2, no presentaban esta anomalía. Cabe puntualizar que la susceptibilidad al rayado únicamente se presentaba en la cara inferior de los vidrios templados.

Mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) se determinó la naturaleza, composición elemental y tamaño de las partículas incrustadas en las superficies de los cristales. La figura 3 corresponde a imágenes a bajos aumentos (x 100), observándose partículas de diversos tamaños. Las figuras 4-5 representan foto micrografías de las partículas incrustadas cuyos espectros de composición indicaban que en su mayoría eran de vidrio y de un tamaño menor a 30 μm . Además de partículas de vidrio se encontraron partículas de composición elemental Si-S-Ca, Fe-S-Ca, Si-Ca-Pb, Al-Si, S-Si, como lo señalan los espectros de la figura 6.



Figura 3. Superficie inferior de los cristales observada en MEB, mostrando partículas incrustadas de diversos tamaños.

A efecto de determinar las fuentes de contaminación, se colectaron partículas de la superficie de :

- Vidrio plano antes de lavar, después de corte y pulido.
- Vidrio plano lavado.
- Vidrio templado.

En todos los casos los análisis de composición de las partículas colectadas, figura 7 , mostraron los mismos elementos constituyentes, principalmente Si, Ca y Fe. Este resultado indicó que la fuente de contaminación de partículas estaba dentro de la planta.

El mecanismo de rayado de los cristales se determinó mediante las siguientes actividades :

- a) Inspección en detalle con microscopía óptica y electrónica del filo de la navaja antes y después de la prueba[®] de rayado en vidrio templado, cara inferior (figura 8).
- b) Inspección exhaustiva de rayas originadas en la cara inferior del vidrio templado, mediante microscopía óptica y electrónica después de la prueba con navaja (figuras 9-11).

De esta forma quedó claro que :

- El problema de rayabilidad ocurre por causas inherentes a la superficie del vidrio.
- Los vidrios entran al horno con una gran cantidad de partículas en su superficie.
- Las partículas son de muy diversas procedencias, tamaños y composición química.
- La temperatura de los rodillos hace que las partículas en la superficie inferior se incrusten a una cierta profundidad, dañando la superficie.
- El vidrio toma partículas de los rodillos y estos del vidrio, incrementando la incrustación.
- La navaja desprende las partículas, y estas producen el rayado (esto explica la convergencia, divergencia y Z's mostradas en las figuras 9-11).
- La cara superior no se raya porque las pocas partículas se remueven fácilmente al no estar incrustadas.
- La solución genérica del problema consiste en remover las partículas antes de entrar al horno.

4.4 " HAZE " EN VIDRIOS TEMPLADOS

Se caracterizaron superficialmente vidrios "aleta" y "cougar" mediante microscopía electrónica de barrido. El vidrio "aleta" mostraba " haze " en la parte central. Estos vidrios presentaban interés debido a que fueron templados después de que se habían realizado diversas actividades de limpieza y mantenimiento en planta, (julio-89). El vidrio " cougar " había sido lavado en México mientras que el tipo " aleta " se lavó en esta Planta. Se pensaba que las partículas que se encontrarían en estos vidrios deberían ser de sílica provenientes de los rodillos transportadores.

En la superficie del vidrio " aleta " se encontró gran cantidad de partículas adheridas, (figura 12), cuyo tamaño era menor de 20 μm de diámetro y la densidad por unidad de superficie se estimaba en 6×10^5 partículas/ dm^2 en las zonas donde se presentaba el " haze ".

En la superficie del vidrio " cougar " se encontró menor cantidad de partículas adheridas en comparación con el vidrio "aleta ". El tamaño de las partículas era menor a los 30 μm de diámetro y se estimaba una densidad por unidad de superficie de

3,500 partículas/dm². Se encontró que buena cantidad de partículas eran de vidrio, además de encontrarse partículas de sílica, Si-Al-Ca y Fe.

El "haze" se presenta debido a una alta densidad de partículas incrustadas superficialmente. Se encontró que vidrios con "haze" presentan valores máximos de rayabilidad y que ésta decrece conforme el número de partículas incrustadas disminuía. Así un vidrio sin partículas incrustadas no presenta el problema de rayabilidad, como son los casos de las caras superiores de los vidrios templados y los vidrios pulidos químicamente.

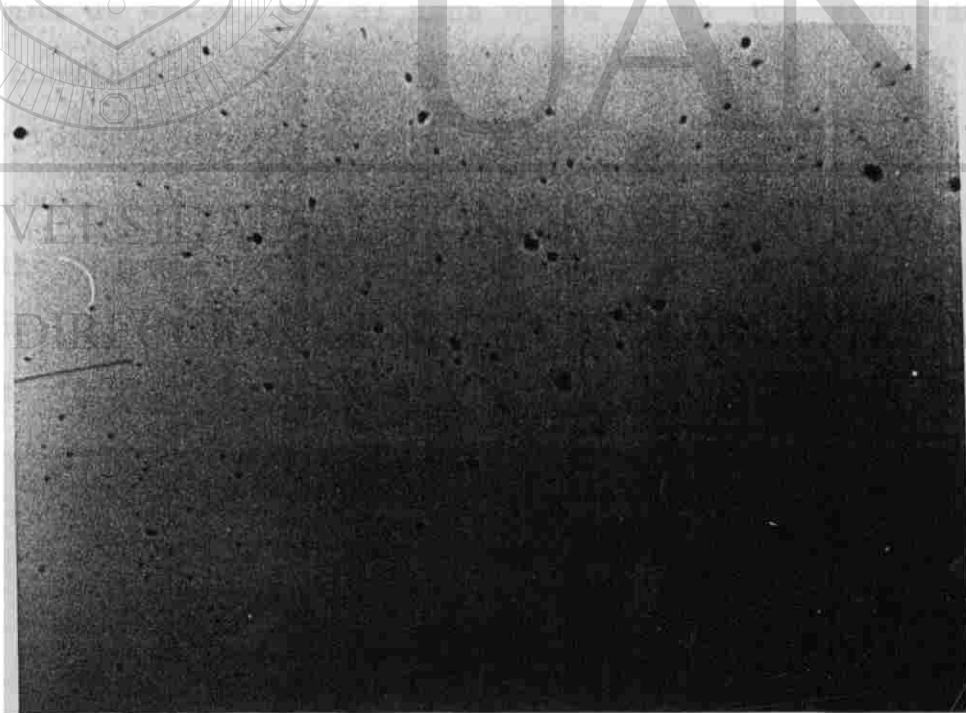
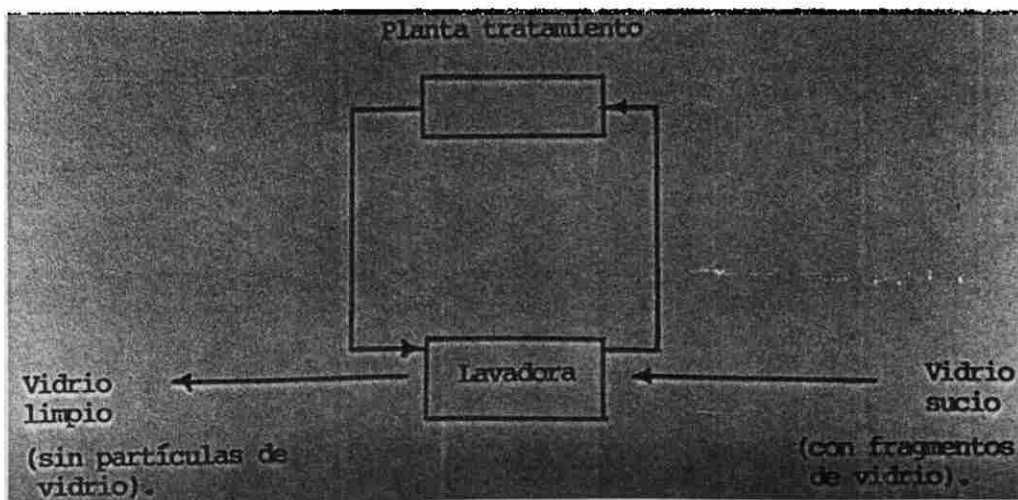


Figura 12. El "haze" que se presentaba en los vidrios de alta rayabilidad consistía en gran cantidad de partículas incrustadas, X 100.

4.5 FUENTES DE CONTAMINACION DE PARTICULAS

En planta la principal fuente de contaminación de partículas de vidrio es sin duda las pulidoras, figura 13. Sólo para tener una idea del orden de magnitud de la cantidad de partículas de vidrio generadas en las pulidoras, si 1 cm^3 de vidrio se divide en partículas esféricas de $10 \mu\text{m}$ de diámetro, el número de éstas que resulta es de 1×10^9 . Esta fuente de partículas contamina tanto el ambiente, figura 14, como el agua que se suministra a las lavadoras. En éstas, el agua es el medio para eliminar de la superficie del vidrio sucio las partículas de vidrio y por ende se contamina de éstas, así el agua actúa como un acumulador. Bajo estas condiciones, el agua actúa simultáneamente como eliminador de partículas del vidrio sucio y como contaminador de partículas del vidrio limpio. El agua de alimentación a lavadoras conforma un circuito cerrado en el cual no existía un elemento para la eliminación de partículas. Este circuito se representa esquemáticamente como sigue:



A efecto de confirmar la presencia de partículas de vidrio en el agua de alimentación de lavadoras, se retuvieron sólidos suspendidos de una muestra del agua que se alimentaba a la lavadora #1 y se identificaron en la microsonda, figura 15. La siguiente tabla muestra la caracterización de las partículas observadas.

COMPOSICION	VIDRIO-Fe	Ca	Fe-Si	Si-Al-Fe	Si-Ca
	60	40	20	20	20
	100	30	30		
	70	20			
	30				
TAMANO DE PARTICULA (μm)	40				
	35				
	25				
	50				
	30				
	40				
	100				
TOTAL DE PARTICULAS	11	3	2	1	1

Cualitativamente se constató la presencia de fragmentos de vidrio, éstos en su mayor parte aparecieron como aglomerados y mezclados con hidróxido de fierro. Posteriormente se cuantificó la cantidad de sólidos suspendidos utilizando muestras de agua de alimentación de la lavadora #2, tomadas diariamente durante 5 días (4-8 Sept. 1989).

Las partículas retenidas también fueron caracterizadas en el microscopio electrónico, confirmando nuevamente la presencia de partículas de vidrio. Con base en la determinación cuantitativa de sólidos retenidos y considerando aglomerados de $\sim 50 \mu\text{m}$ de diámetro se estimó una densidad volumétrica de 11.5×10^3 aglomerados por litro de agua que se suministra a las lavadoras.

Para evitar dicha contaminación, la empresa decidió (septiembre 1989) implementar un sistema de filtración de agua que operaría como paso posterior al tratamiento de aguas, suministrando así, agua tratada y libre de sólidos suspendidos (partículas de vidrio) a las lavadoras.

Al inicio de operación de este sistema, se utilizó un filtro de poro nominal de $10 \mu\text{m}$ que funcionaba de la siguiente manera: Al principio dejaba pasar gran cantidad de partículas, estimado hasta $100 \mu\text{m}$. A medida que transcurría el tiempo las partículas o aglomerados de mayor tamaño $> 100 \mu\text{m}$ bloqueaban los poros aumentando la eficiencia de filtración, hasta llegar a un estado en el que prácticamente llegaba a taparse. Como se observó anteriormente las partículas que se encontraron en vidrios templados que presentaban el fenómeno "haze" tenían un tamaño menor a $30 \mu\text{m}$, por lo que se recomendaba utilizar un filtro de poro de menor tamaño.

Personal de la empresa seleccionó un filtro de tamaño de poro nominal de 2 μm consistente en un aglomerado de fibras de plástico con múltiples puntos de sujeción obtenidas por fusión. El sistema así, presentaba alta resistencia mecánica, garantizando estabilidad del tamaño de poro durante la operación, y la superficie acolchonada obtenida en su cara superior brindaba mayor área de filtración. Muestras de este filtro después de haber operado en planta fueron observadas y caracterizadas por SEM, figura 16, encontrándose completamente cubiertos de aglomerados de Vidrio-Fe.

Las estadísticas de la prueba de rayabilidad de vidrios templados mostraron que la utilización del sistema de filtración fué una solución importante para disminuir el problema de rayabilidad.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

4.6 EFECTO DEL SO_2 EN LA RAYABILIDAD

En la figura 17 se observa el patrón de depósitos en la superficie de los rodillos del horno de templado, encontrados después de 6 meses de operación (Dic. 1989). Estos compuestos fueron analizados, figura 18 , resultando estar constituidos por S, Si, Na, Ca y cantidades menores de Cr y Fe.

Se observó que estos compuestos producen deterioro superficial de los rodillos. En alta temperatura $650 \text{ }^\circ\text{C}$ estos compuestos se encuentran en estado plástico y se " anclan " a los rodillos, durante el enfriamiento (rodillo fuera de operación) y debido a diferencias en coeficientes de expansión se produce descascaramiento superficial.

El patrón de compuestos de alto contenido de S en los rodillos está completamente ligado a las líneas de suministro de SO_2 en el interior de los hornos de templado. Existen actualmente diferencias en este aspecto entre los hornos 1 y 2.

Anteriormente en cada paro de mantenimiento, el método de limpieza utilizado en los rodillos consistía en un pulido mecánico con lija grado 300. Esto producía que la superficie de los rodillos fuera más susceptible a liberar partículas de sílica

además de que se debía realizar un estricto lavado superficial para retirar las partículas desprendidas durante el pulido.

Para lograr un mejor acabado y menor daño superficial de los rodillos y en base a que la mayor parte de los compuestos formados en su superficie eran solubles en agua se recomendó enjuagar sólomente con el sistema agua desmineralizada/vapor a presión retirando el pulido mecánico. La figura 19 muestra pruebas de limpieza de rodillos realizados con el método anterior.

Observaciones de planta mostraron que los depósitos formados sobre los rodillos por la inyección de SO_2 al horno, juegan entre otros factores, papeles importantes de inhibición de la susceptibilidad al rayado de los vidrios. Siempre en los arranques, después de paros de mantenimiento, en los que los rodillos fueron sometidos a rectificadores con lija y los depósitos fueron eliminados en su totalidad, el índice de rayabilidad se presentó muy alto. También se evidenció que conforme transcurría el tiempo, el grado de rayabilidad era muy bajo, los rodillos presentaron una formación importante de depósitos, en contraste cuando la rayabilidad fué alta o considerable, los rodillos presentaron una incipiente formación de depósitos. El mecanismo de inhibición de rayabilidad de estos compuestos, su cinética de formación y crecimiento, y sus efectos nocivos sobre los rodillos

no han sido hasta el momento investigados en profundidad para su total comprensión. Un conocimiento completo permitiría una formación natural o artificial rápida de los depósitos, una eficiente inhibición de la rayabilidad y un nulo ataque a los rodillos.

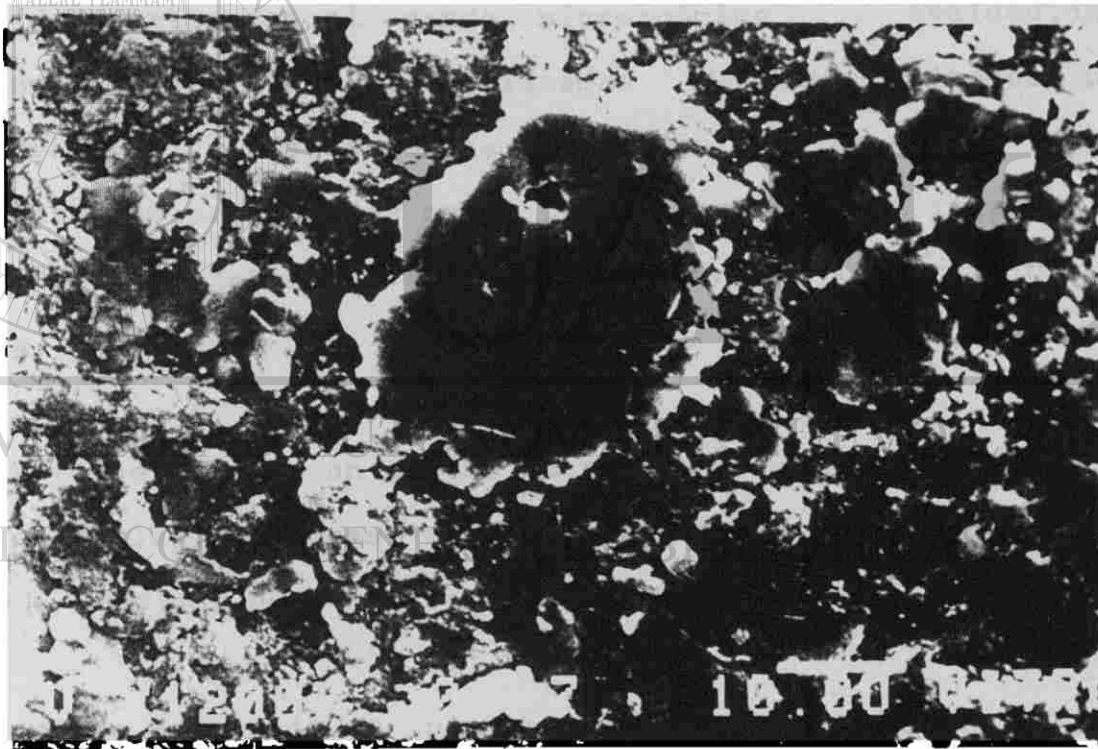


Figura 20. Partículas de Si-S-Ca de $27 \mu\text{m}$ adherida a la superficie del rodillo de sílica.

4.7 AUDITORIA A LAVADORAS

Como se mencionó anteriormente las pulidoras son la principal fuente de contaminación de partículas de vidrio y éstas deben de removerse en el sistema de lavadoras además de la suciedad normal de los cristales.

Debido a que las partículas causantes del problema de rayabilidad pertenecen al rango microscópico, evaluaciones (eficiencias de lavado) realizadas mediante métodos por microscopía óptica y electrónica eran demasiado laboriosos y los resultados eran presentados mucho tiempo después de iniciada la evaluación sin tener una firme contribución a la solución del problema.

Se optó por buscar un método macroscópico capaz de evaluar la operación de las lavadoras, de fácil aplicación y que pudiera ser llevado a cabo por personal de planta.

El método consistió en pintar mediante un crayón de cera diversas regiones de las caras de los vidrios planos para evaluar la capacidad de remoción de cada una de las lavadoras. Pruebas en laboratorio indicaron que los residuos del crayón eran fácilmente removibles cuando se utilizaba acción mecánica (cepillos), agua caliente y jabón en forma conjunta.

En enero de 1990 se realizó una auditoría de la eficiencia de las 5 lavadoras de vidrio de la planta, utilizando el método mencionado. Se encontró en algunos casos que los vidrios salían de las lavadoras con el mismo grado de suciedad con el que entraban, con excepción de una lavadora que casi removía la mayor parte de los residuos del crayón. El resultado general de la prueba indicó deficiencia operacional del sistema de lavado.

En base a esta prueba, la Gerencia de Control de calidad diseñó un procedimiento para evaluar la operación de los sistemas de lavado, los resultados de las evaluaciones permiten actualmente tomar decisiones sobre el ajuste de las lavadoras para garantizar una limpieza eficiente de los cristales.

La acción conjunta en lavadoras de agua libre de partículas y una remoción eficiente de las partículas de los cristales repercutió en una disminución espectacular y controlada del índice de rayabilidad en los cristales como se muestra en la figura siguiente, en la cual se indican los niveles de rayabilidad de la pieza " Cuarto trasero Bronco " para varias corridas realizadas antes y después de la implementación de las medidas preventivas.

FECHA		HORA		LECTURA No.		CUMPLI		RANGO		PROMEDIO X		RANGO R	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98
99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154
155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168
169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182
183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196
197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210
211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224
225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238
239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252
253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266
267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280
281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294
295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308
309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322
323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336
337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350
351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364
365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378
379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392
393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406
407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420
421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434
435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448
449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462
463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476
477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490
491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504
505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518
519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532
533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546
547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560
561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574
575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588
589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602
603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616
617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630
631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644
645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658
659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672
673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686
687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700

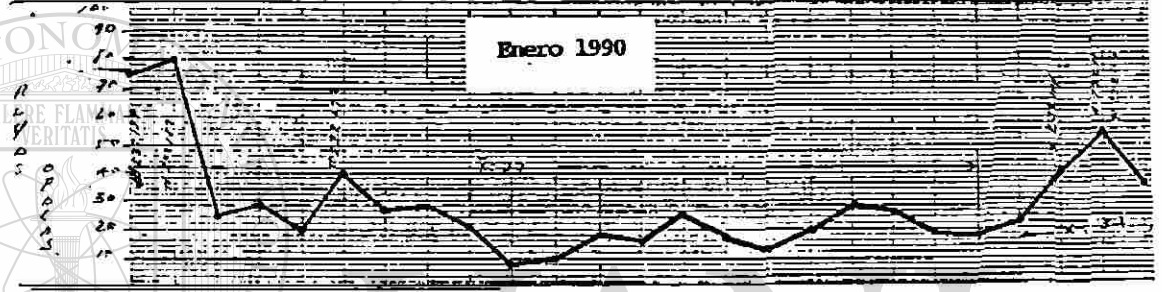


Figura 21. Niveles de Rayabilidad obtenidos antes y después de la implementación de las medidas preventivas.

4.8 CONCLUSIONES

- La rayabilidad es una consecuencia de las partículas de vidrio incrustadas en la cara inferior de los cristales por el contacto con los rodillos en el horno de templado.

- La fuente principal de partículas son las pulidoras. Durante el pulido de los cristales se generan las partículas y parte de ellas se depositan sobre la superficie.

- Una remoción ineficiente de las partículas del cristal provoca una alimentación al horno de cristales con partículas y consecuentemente vidrio templado susceptible a ser rayado.

- El agua de lavadoras es el vehículo de remoción de las partículas depositadas en los cristales durante el pulido. Para su reutilización es necesario remover las partículas previamente captadas para evitar su redeposición sobre los cristales que provocaría nuevamente la producción de vidrio templado con partículas, susceptible a ser rayado.

- Con base en lo anterior, para producir vidrio no susceptible a ser rayado se debe alimentar al horno cristales libres de partículas de vidrio.
- Para las condiciones de planta, vidrio libre de partículas se lograría mediante:
 - Una remoción continua de partículas de vidrio del agua del circuito de lavado.
 - Y una eficiente operación del sistema de cepillos, agua y jabón de las labadoras.

LA IMPLEMENTACION EN PLANTA DE LAS MEDIDAS PREVENTIVAS DIO
COMO RESULTADO UNA DISMINUCION IMPORTANTE Y CONTROLADA DEL
NIVEL DE RAYABILIDAD DEL VIDRIO TEMPLADO.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Actualmente el índice de rayabilidad del horno 2 (niveles prácticamente de cero) es inferior al obtenido en el horno 1 (nivel promedio de 10).

La diferencia aparente en la disminución del índice de rayabilidad entre los hornos, estriba en la cantidad y tamaño de los depósitos (" pecas ") formados sobre los rodillos de los hornos de templado. El horno 1 presentó una formación de depósitos notablemente inferior a la observada en el horno 2.

Observaciones en planta mostraron que los depósitos ("pecas") contribuyen al abatimiento de la rayabilidad del vidrio templado aunque originan deterioro superficial de los rodillos de sílica.

El mecanismo de inhibición en la rayabilidad del vidrio templado por los depósitos, su cinética de formación y crecimiento, y una cuantificación de sus efectos nocivos sobre los rodillos de sílica no han sido hasta el momento investigados en profundidad para su total comprensión.

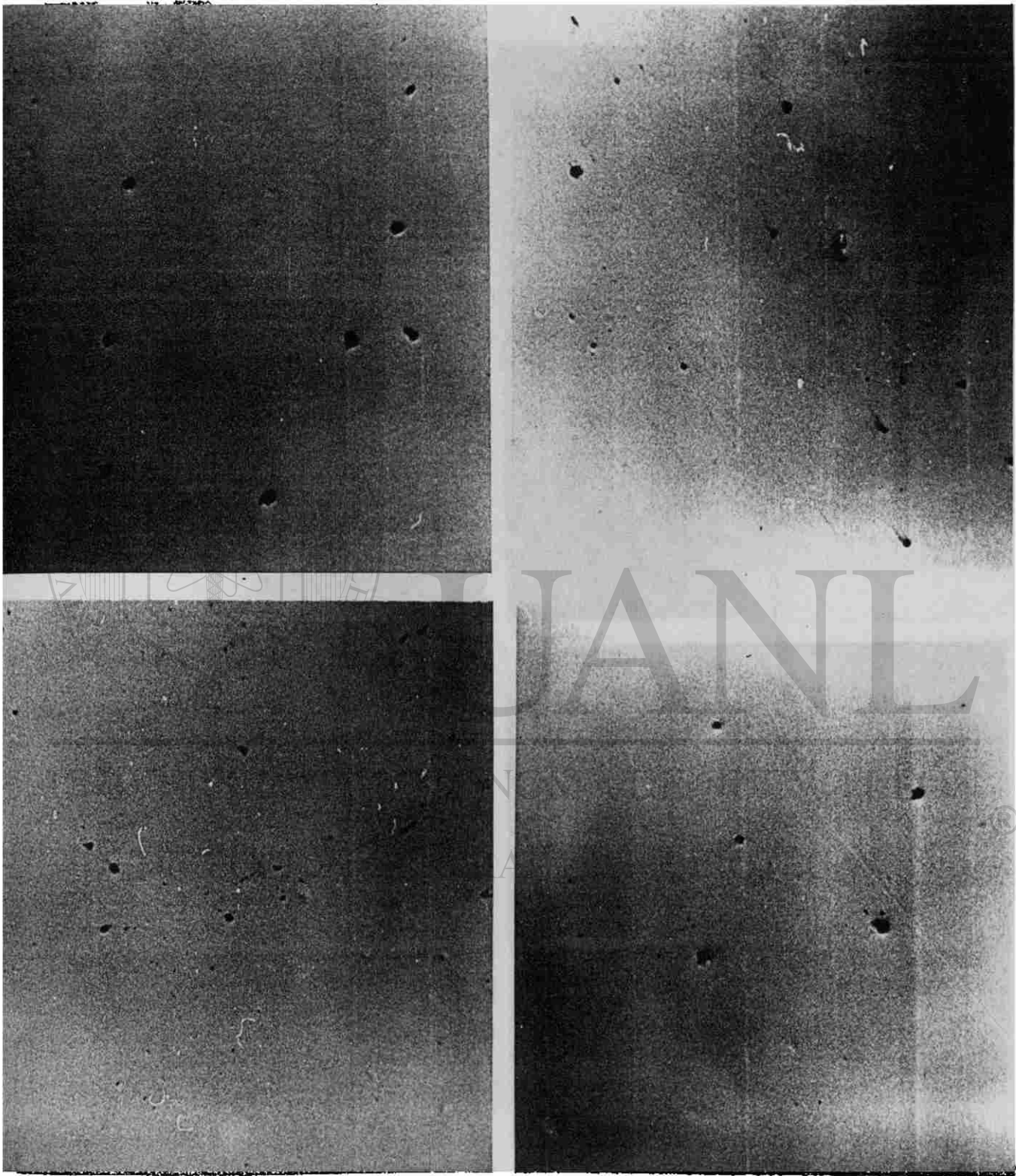


Figura 1. Superficie inferior de los cristales.
Los puntos negros corresponden a partículas
incrustadas, 200 X.

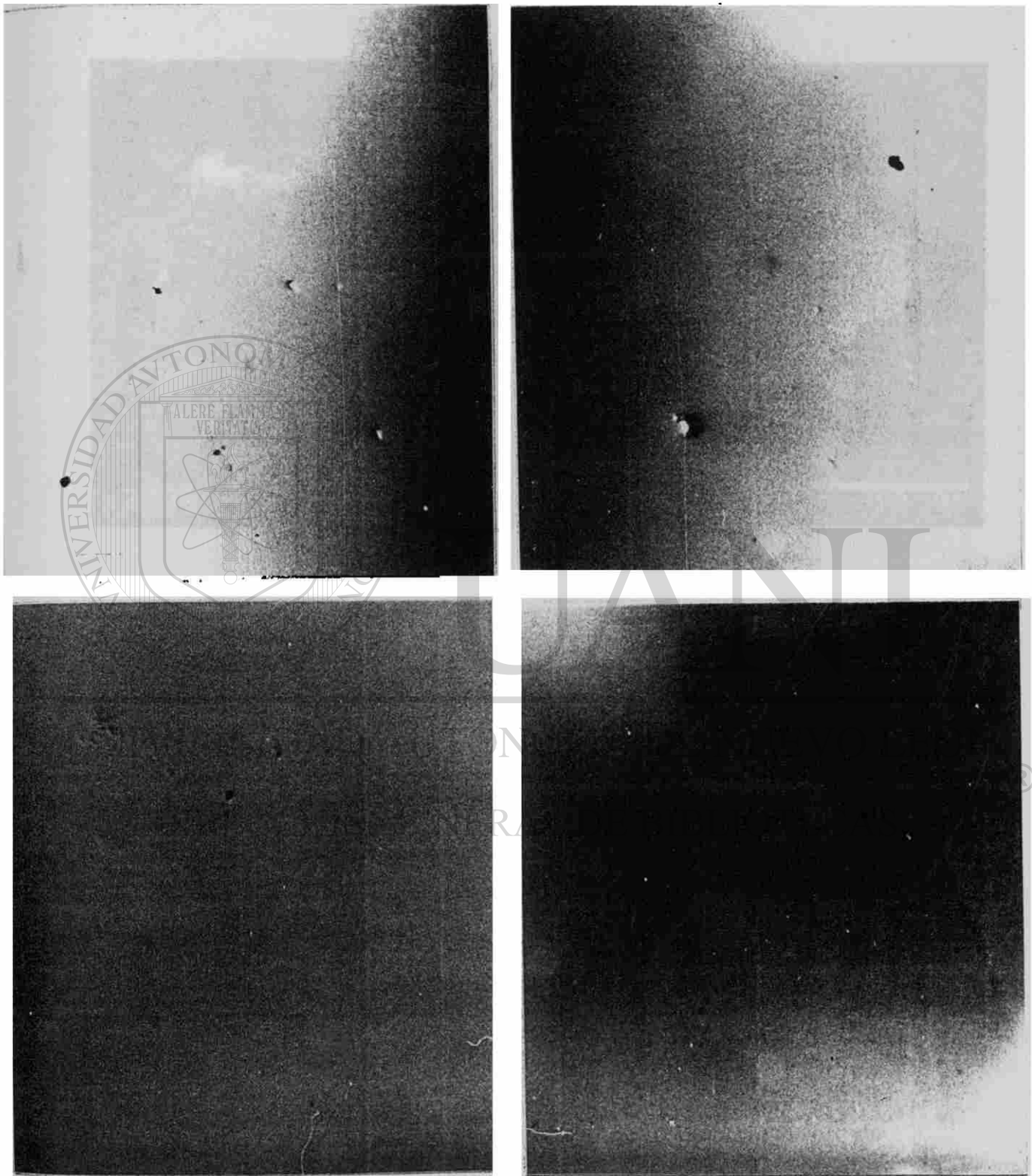


Figura 2. Superficie superior de los cristales.
Superficie libre de partículas , X 200.

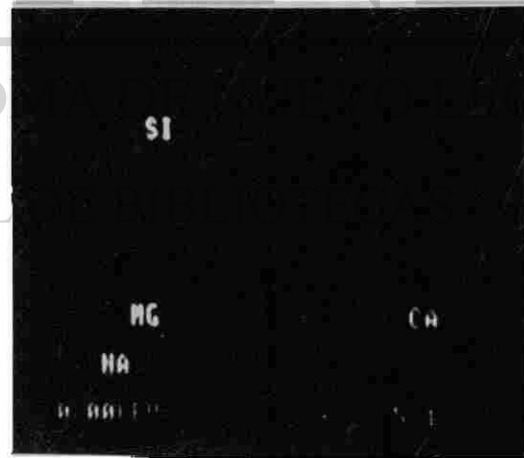
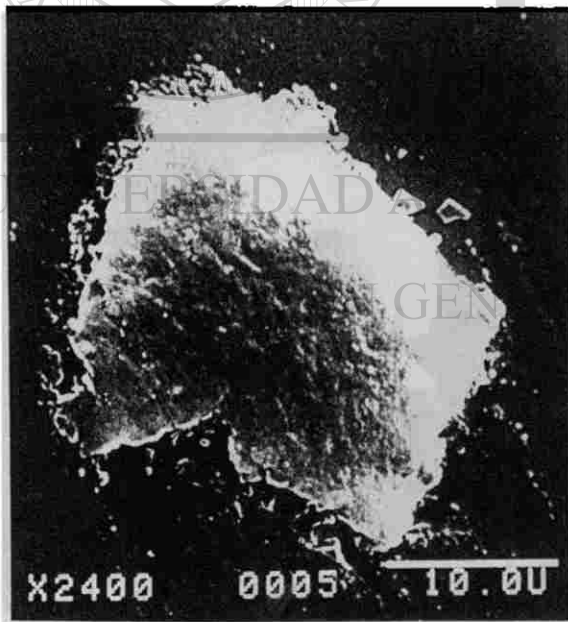
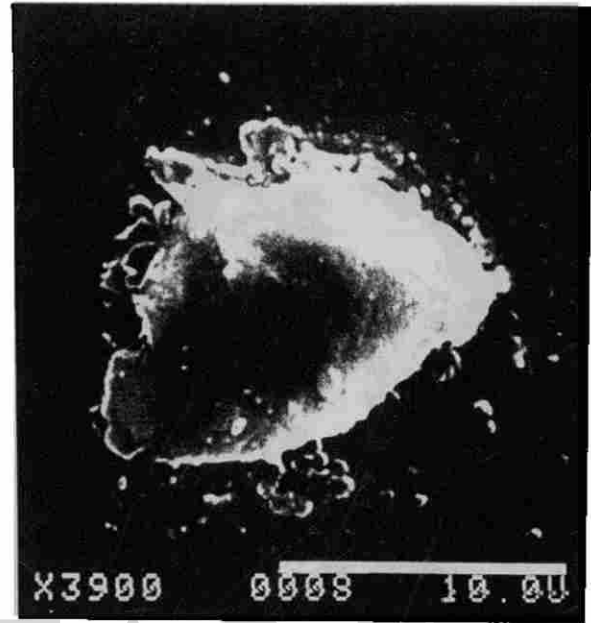
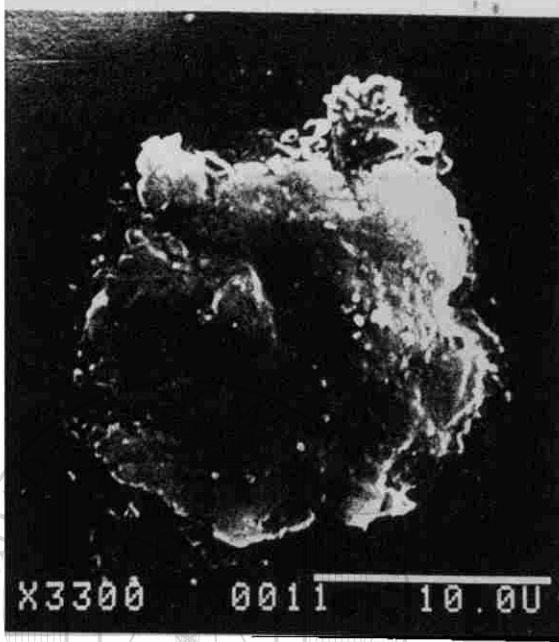


Figura 4. Partículas de vidrio incrustadas en la superficie inferior de los cristales.

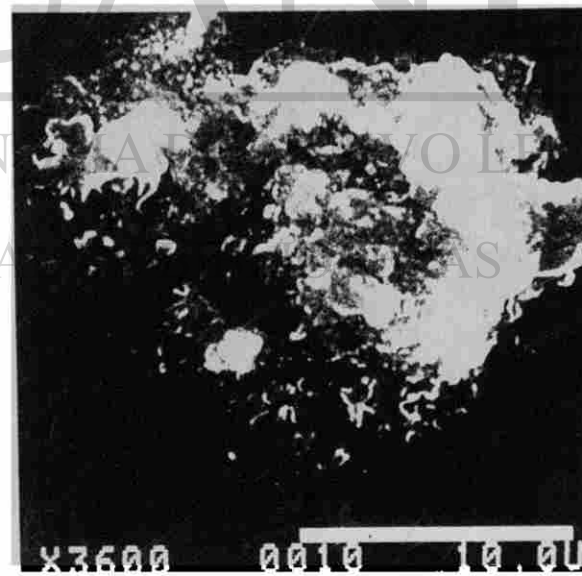
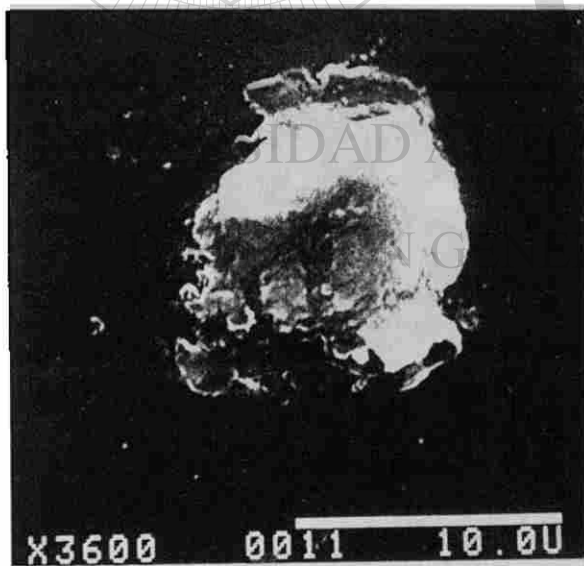
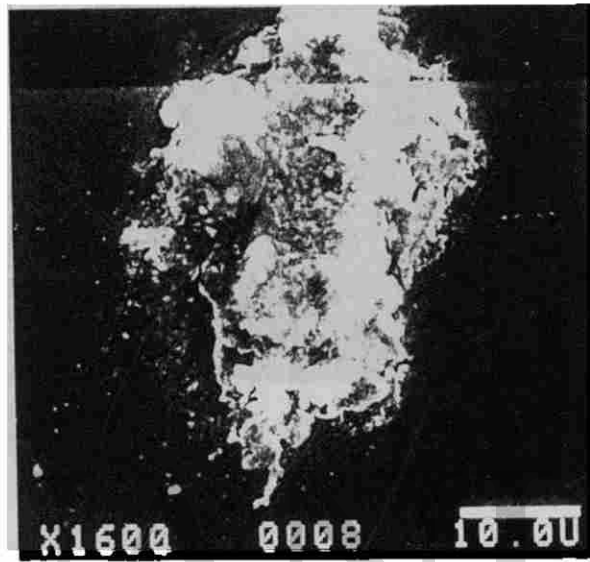
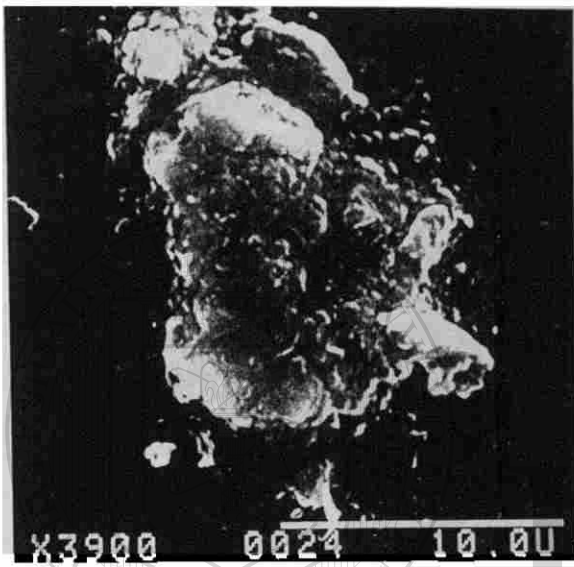


Figura 5. Partículas de vidrio incrustadas en la superficie inferior de los cristales.

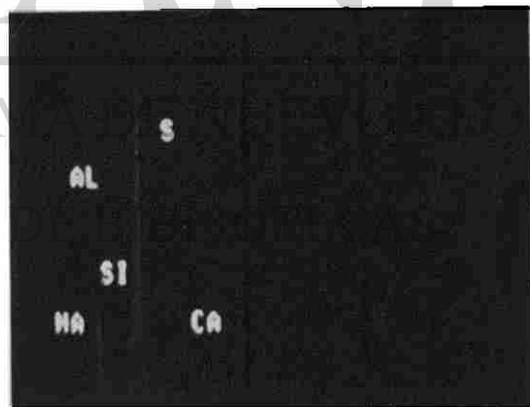
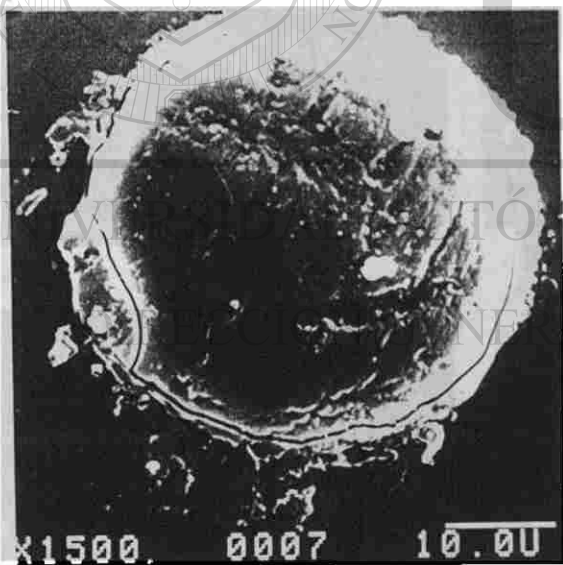
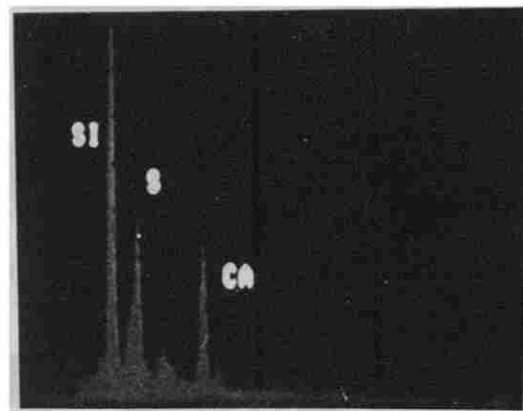
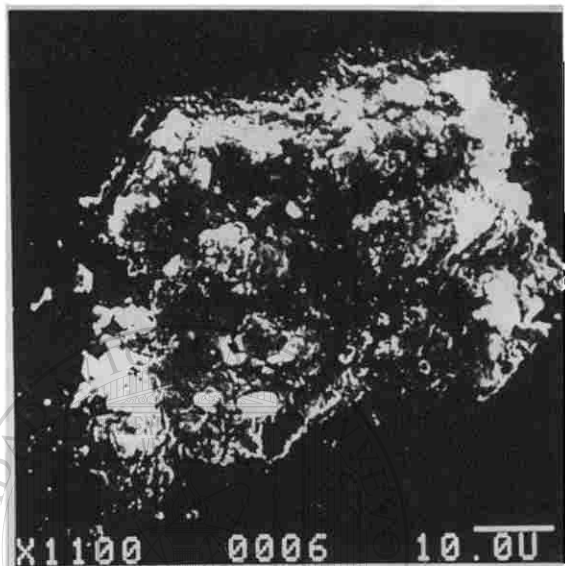
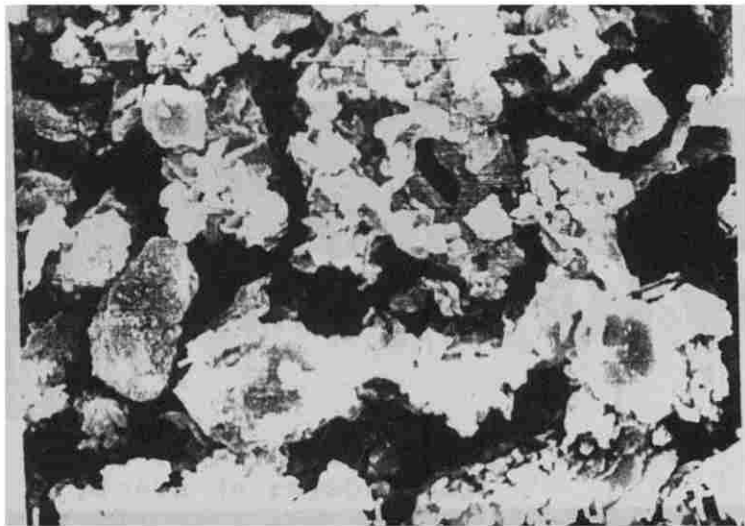
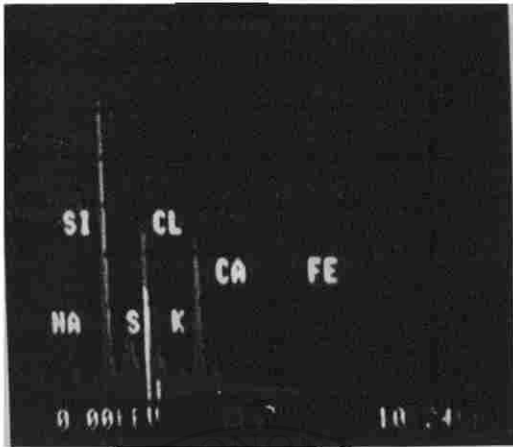
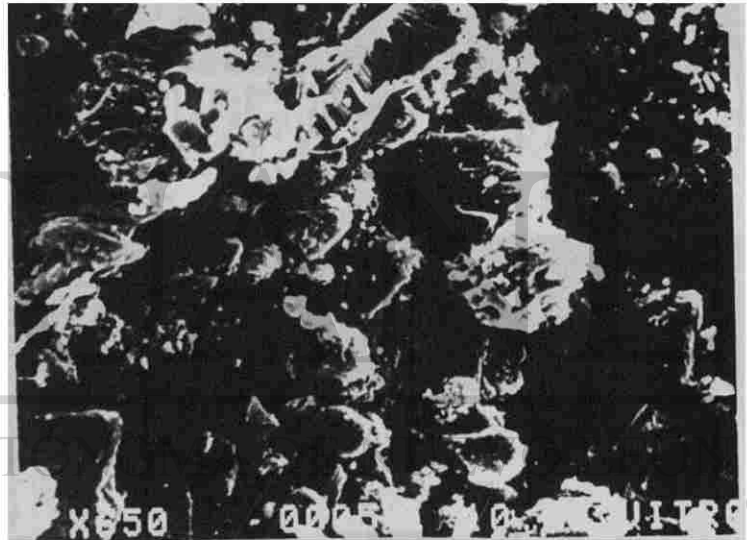
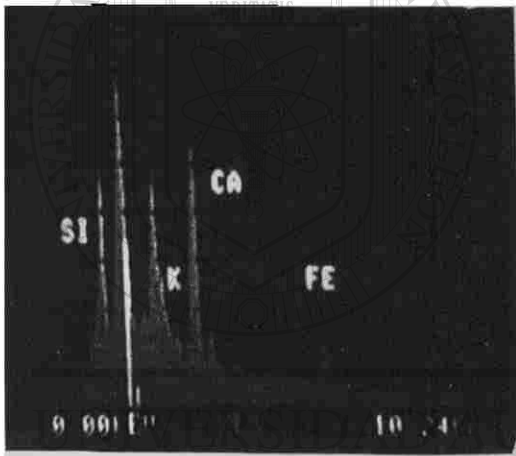


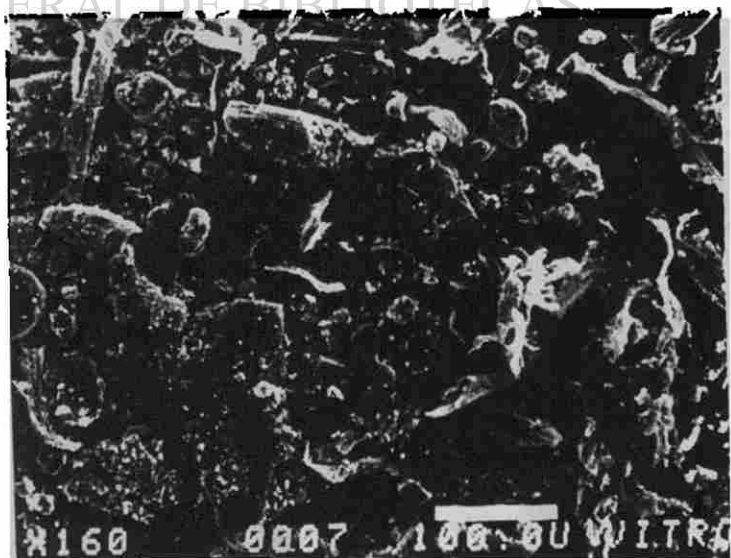
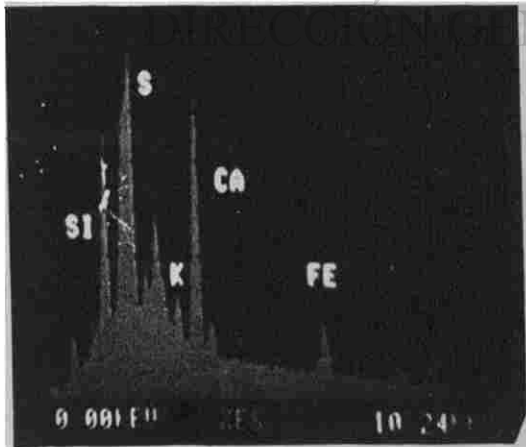
Figura 6. Morfología de partículas incrustadas en los cristales y sus respectivos espectros de composición elemental que indican otro tipo de partículas (diferentes a las de vidrio).



Vidrio plano después pulido, antes de lavar.

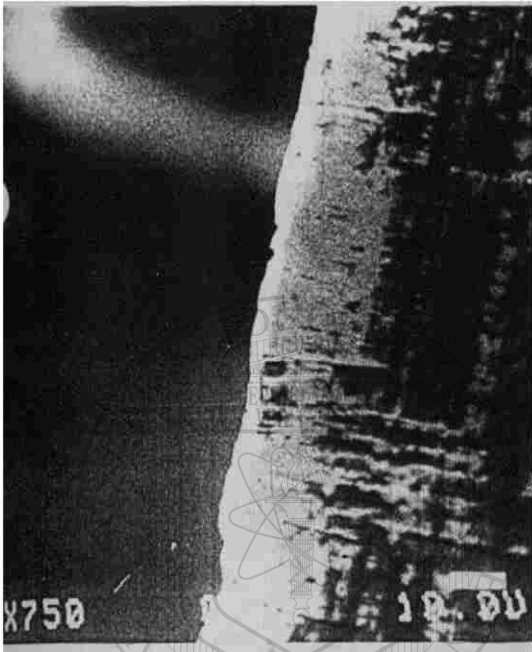


Vidrio plano lavado.



Vidrio templado.

Figura 7. Partículas colectadas de la superficie del cristal en diferentes etapas del proceso.



Filo de la navaja después de la prueba de la rayabilidad.

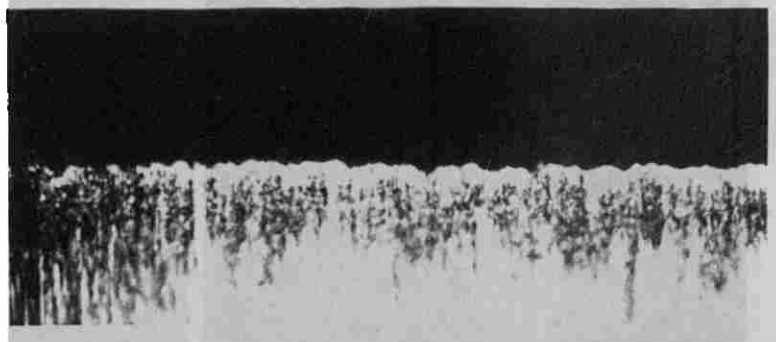
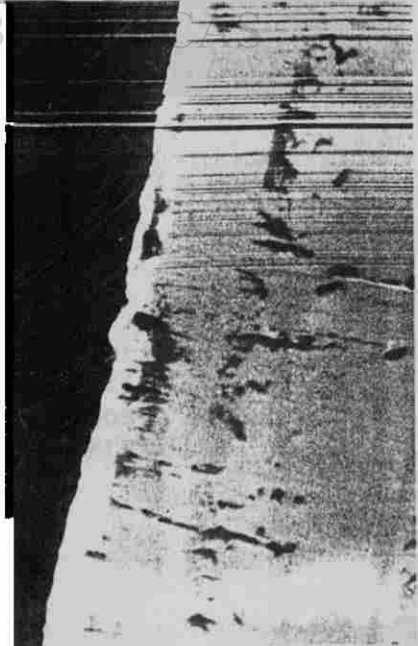
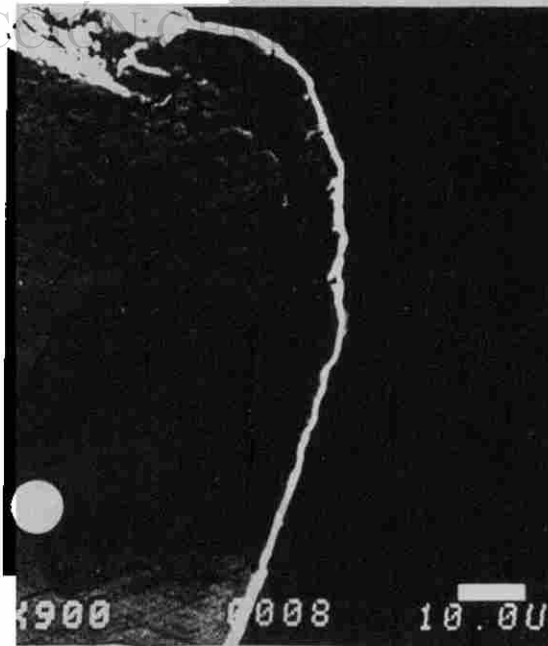


Figura 8. Filo de la navaja antes de la prueba de rayabilidad.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

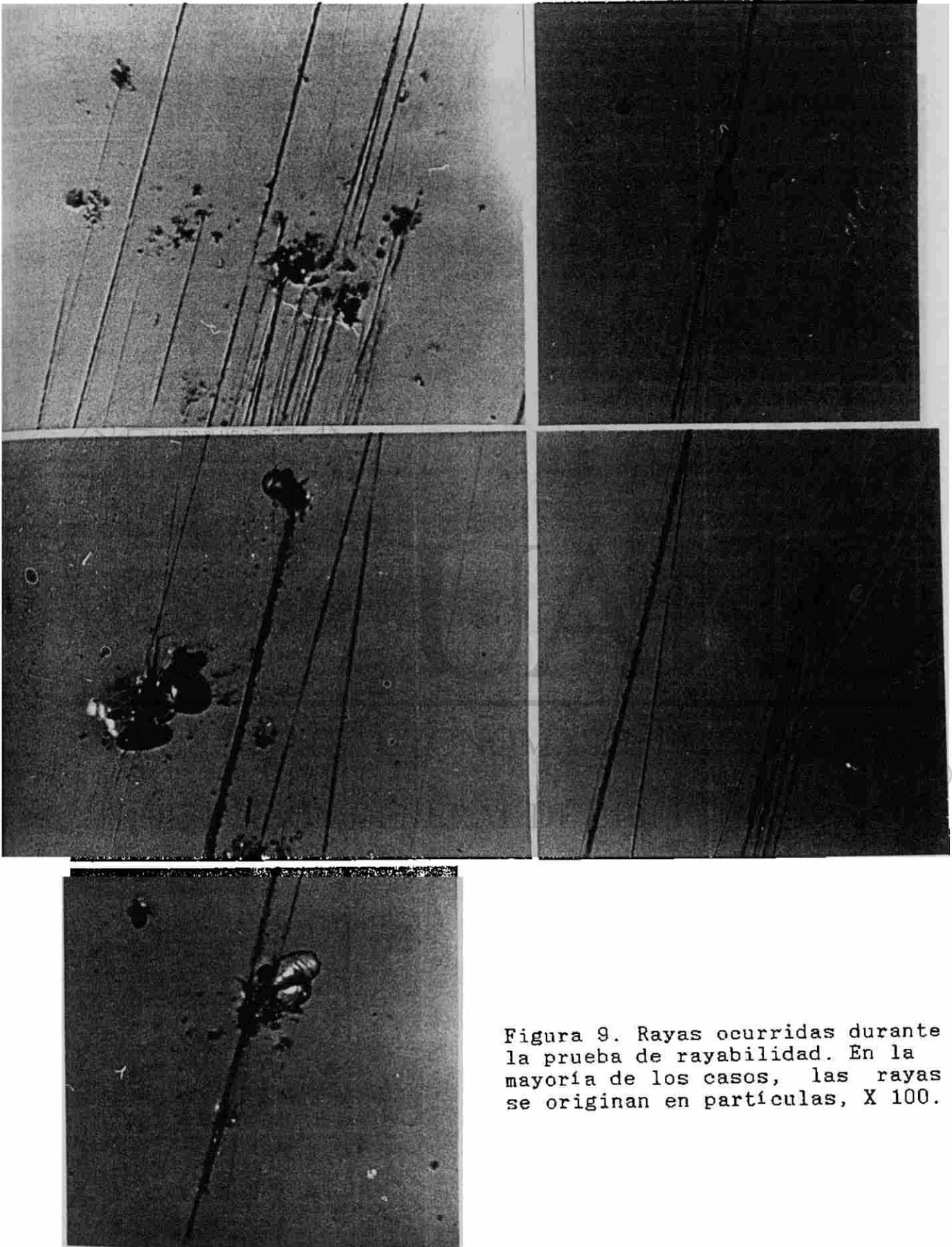


Figura 9. Rayas ocurridas durante la prueba de rayabilidad. En la mayoría de los casos, las rayas se originan en partículas, X 100.

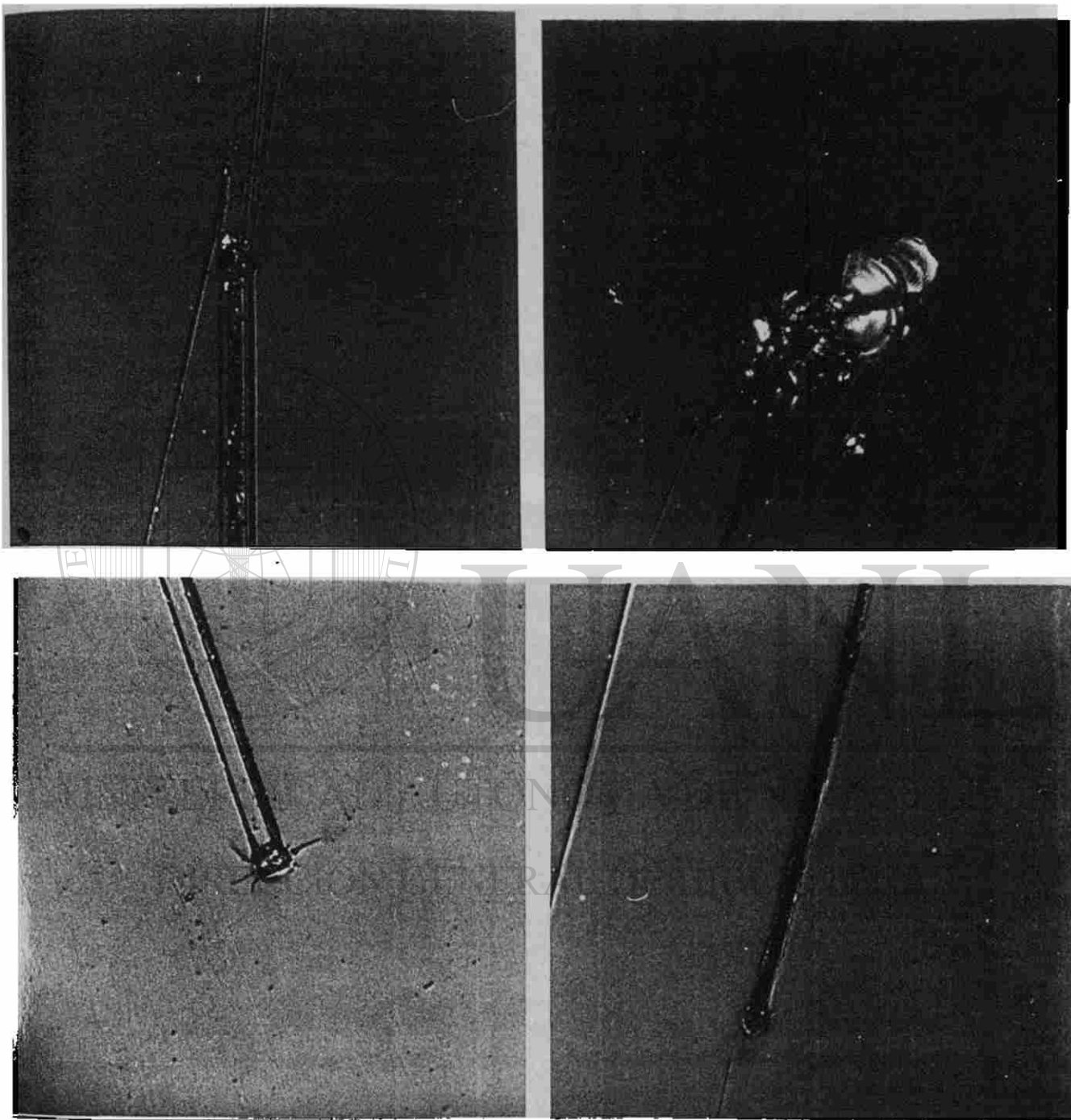


Figura 10. Amplificación del inicio de rayas en el cristal, X 200.

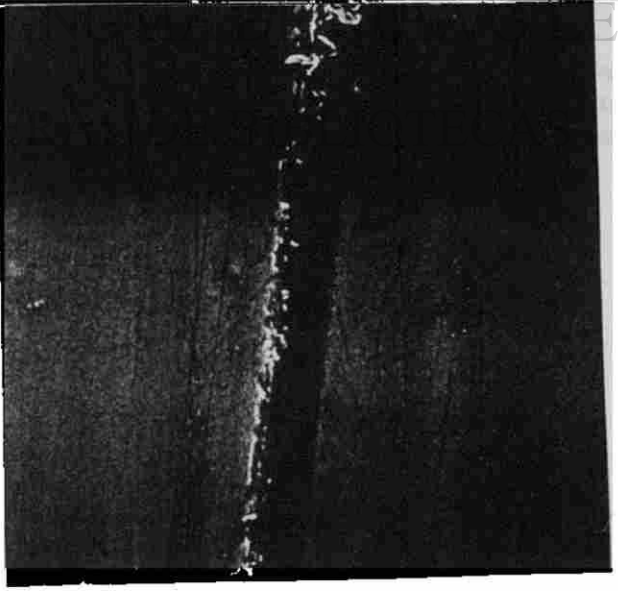
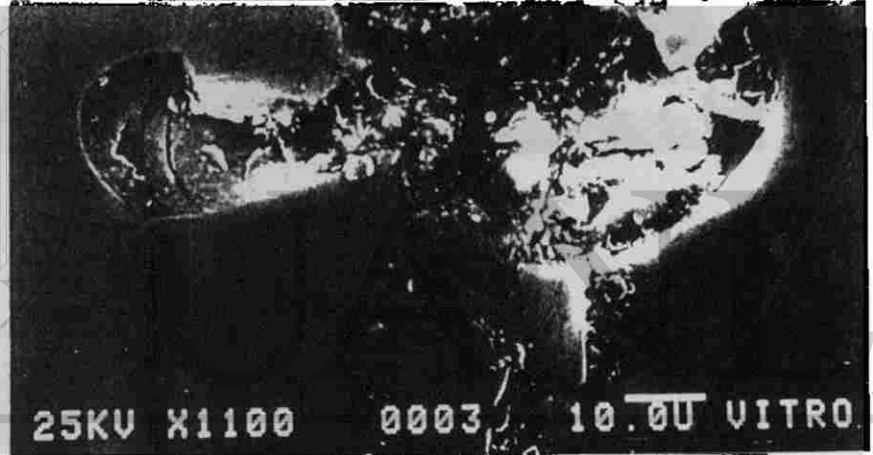
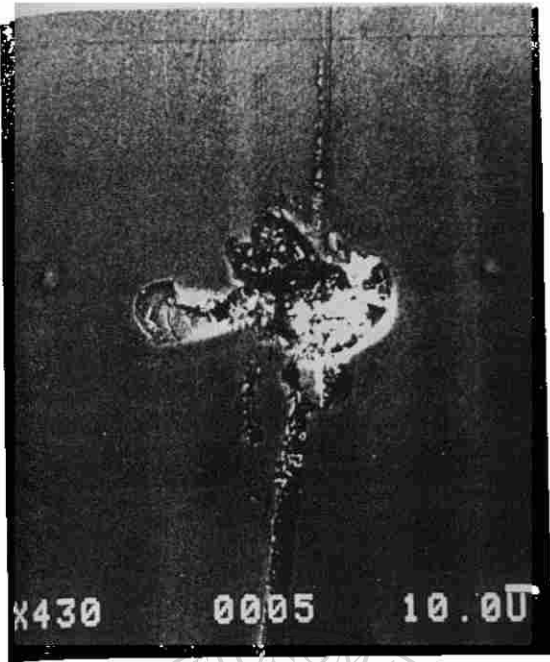
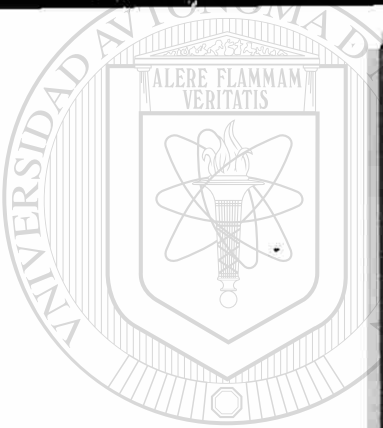
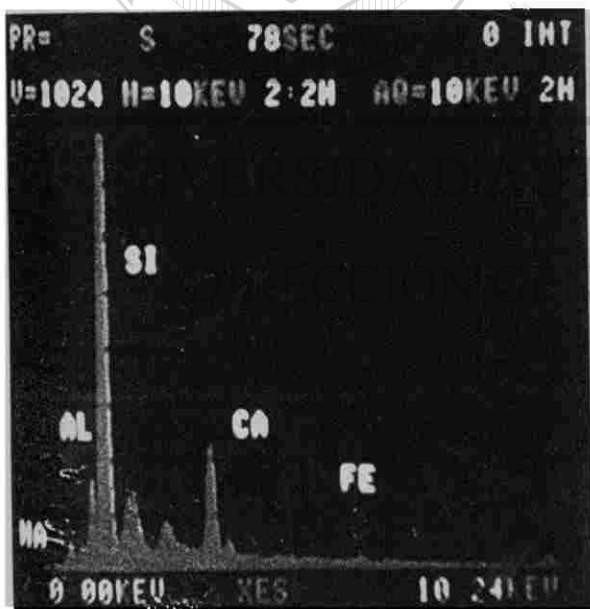
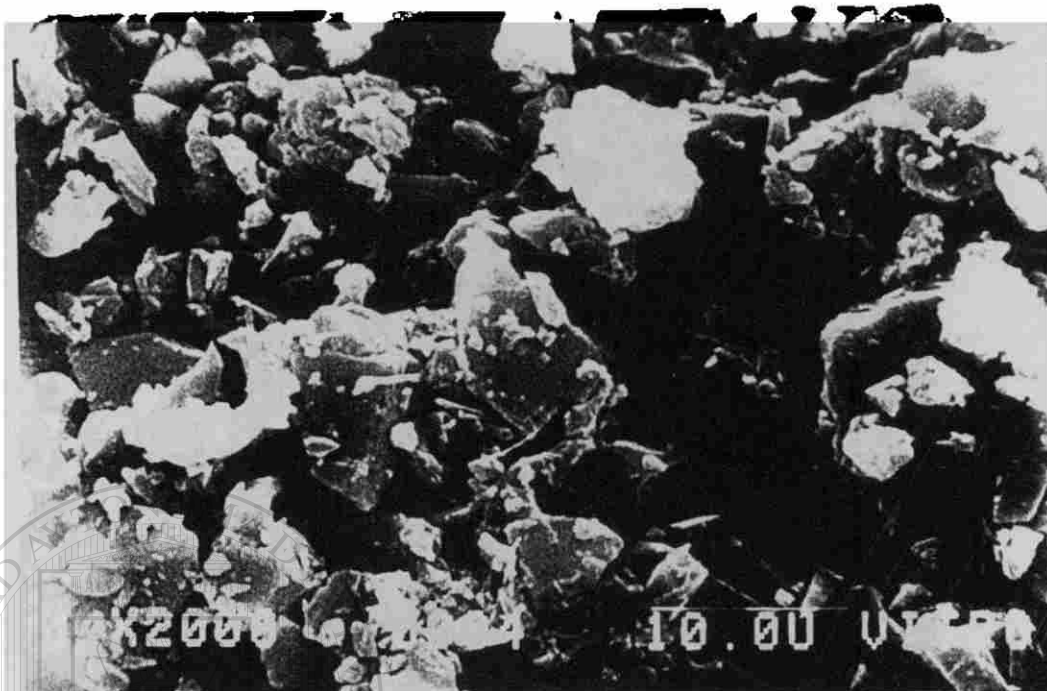


Figura 11. Imagen en MEB del inicio de una raya en el cristal, producida durante la prueba de rayabilidad.

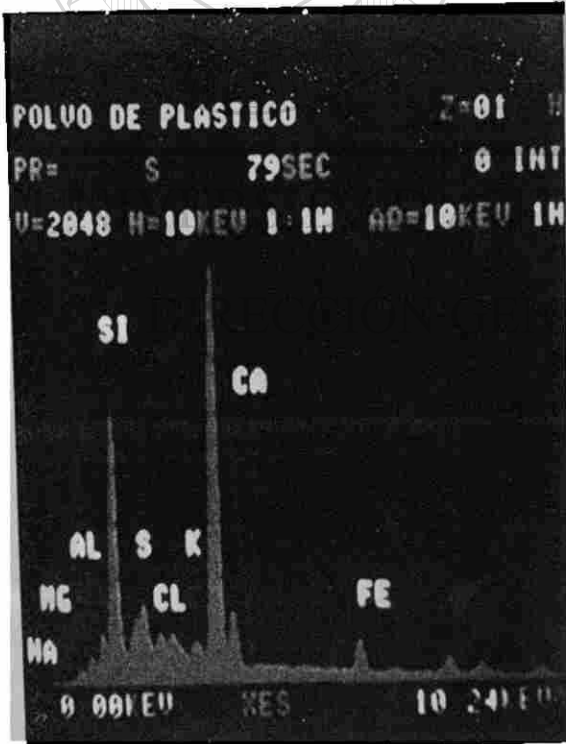




UANL

ÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Figura 13. Partículas colectadas de sedimentos en las pulidoras de los cristales. El análisis de composición muestra que son de vidrio y su tamaño resulta ser hasta menor a $10 \mu\text{m}$.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Figura 14. Partículas colectadas del ambiente interior de la planta. Se encontraron partículas de vidrio, además de Ca (posiblemente en carbonatos), Fe, S principalmente.

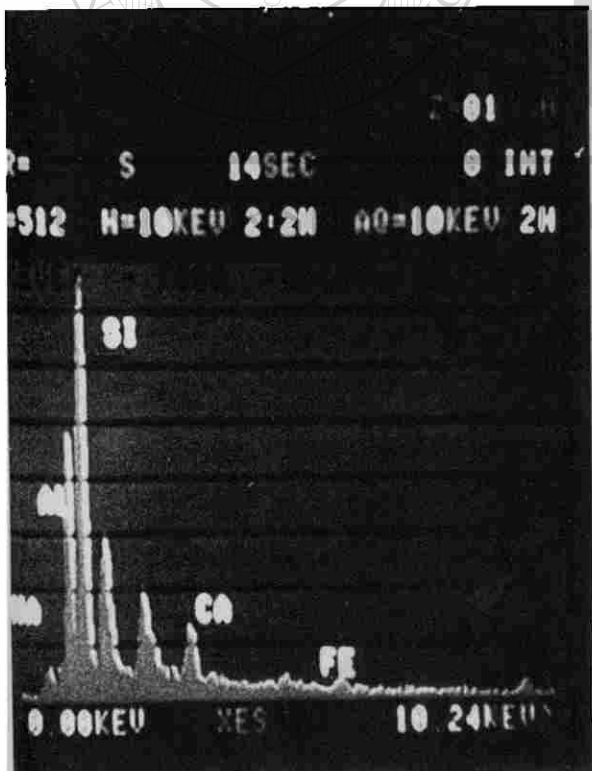
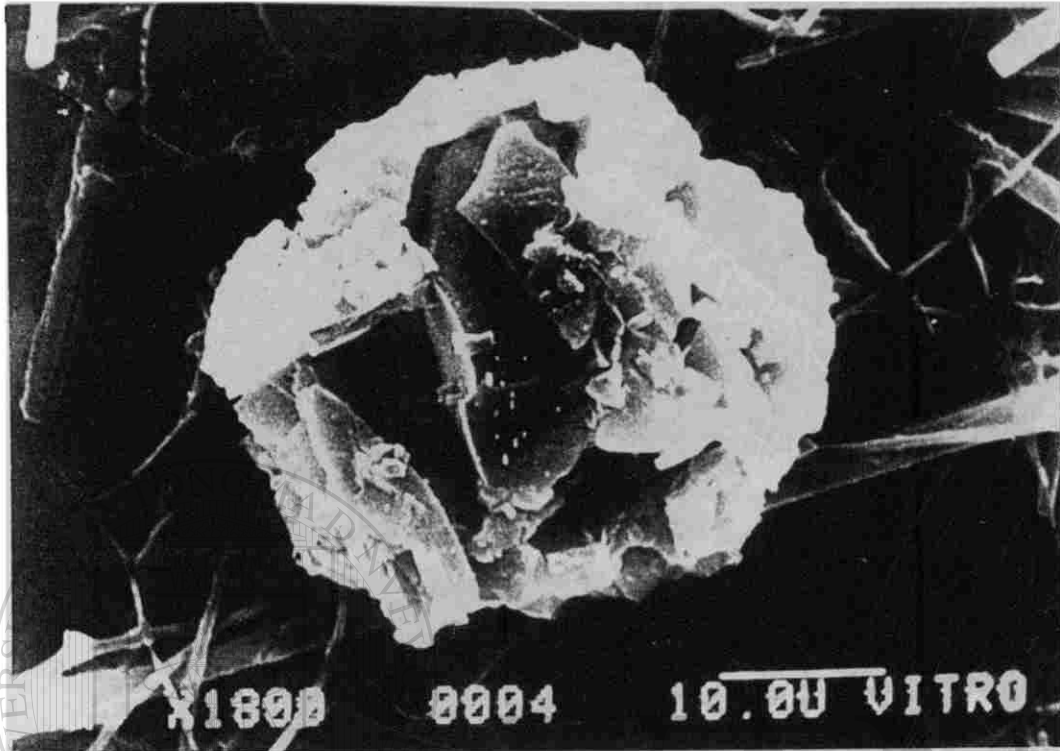


Figura 15. Aglomerado de partículas Vidrio-Fe que se encuentra como sólido suspendido en el agua que se suministra a lavadoras de vidrio a templar.

GENERAL DE BIBLIOTECAS

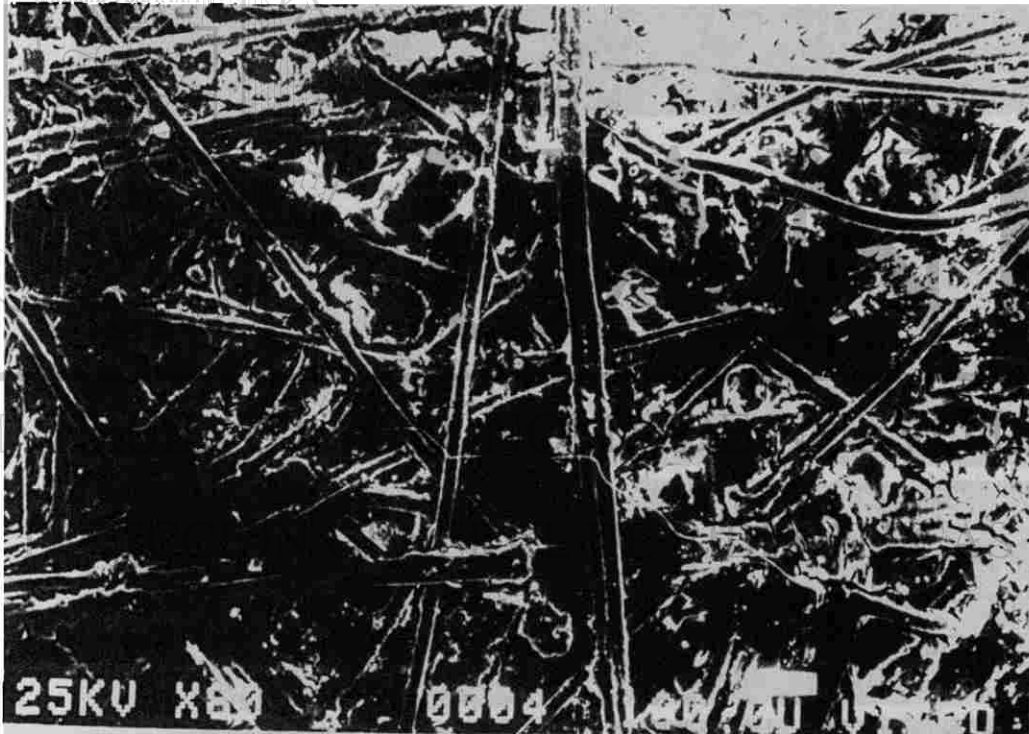
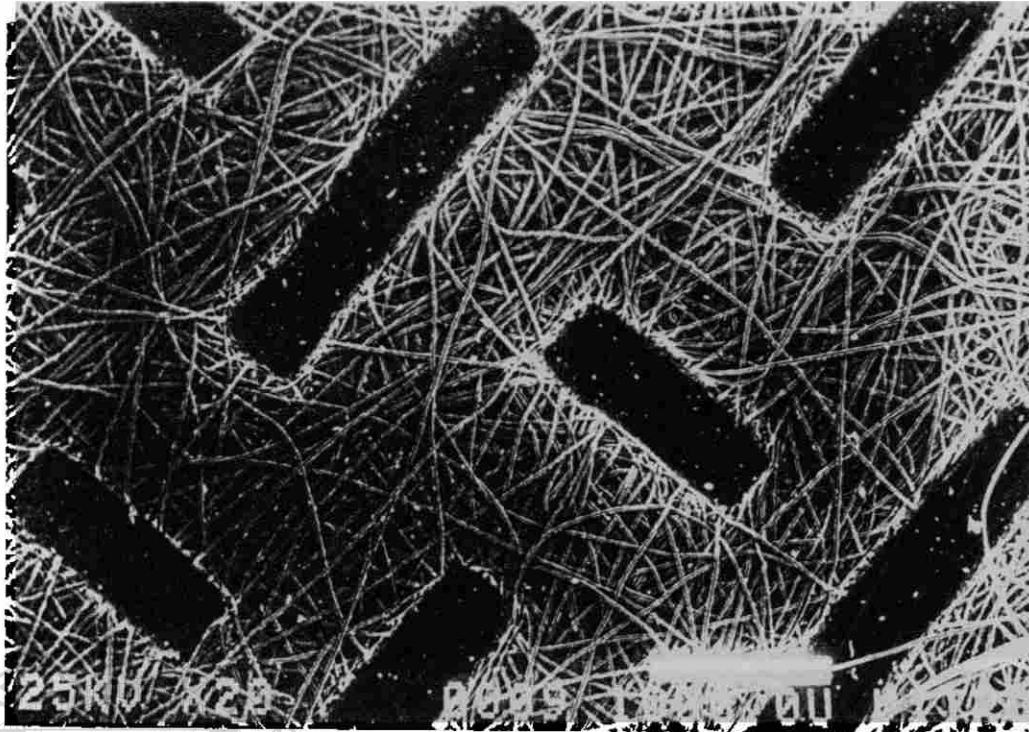
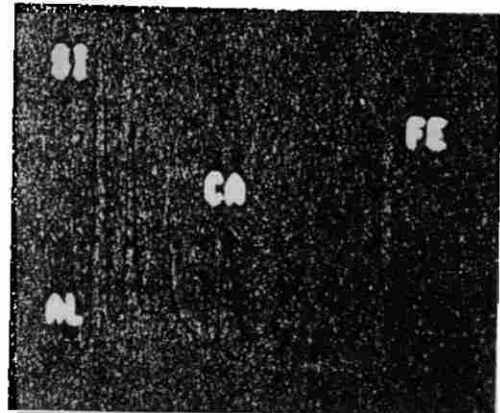


Figura 16. Imagen del filtro de tamaño de poro nominal de $2\ \mu\text{m}$ antes y después de operación. El filtro retiene la mayor parte de los aglomerados de partículas Vidrio-Fe, como lo muestra el espectro.



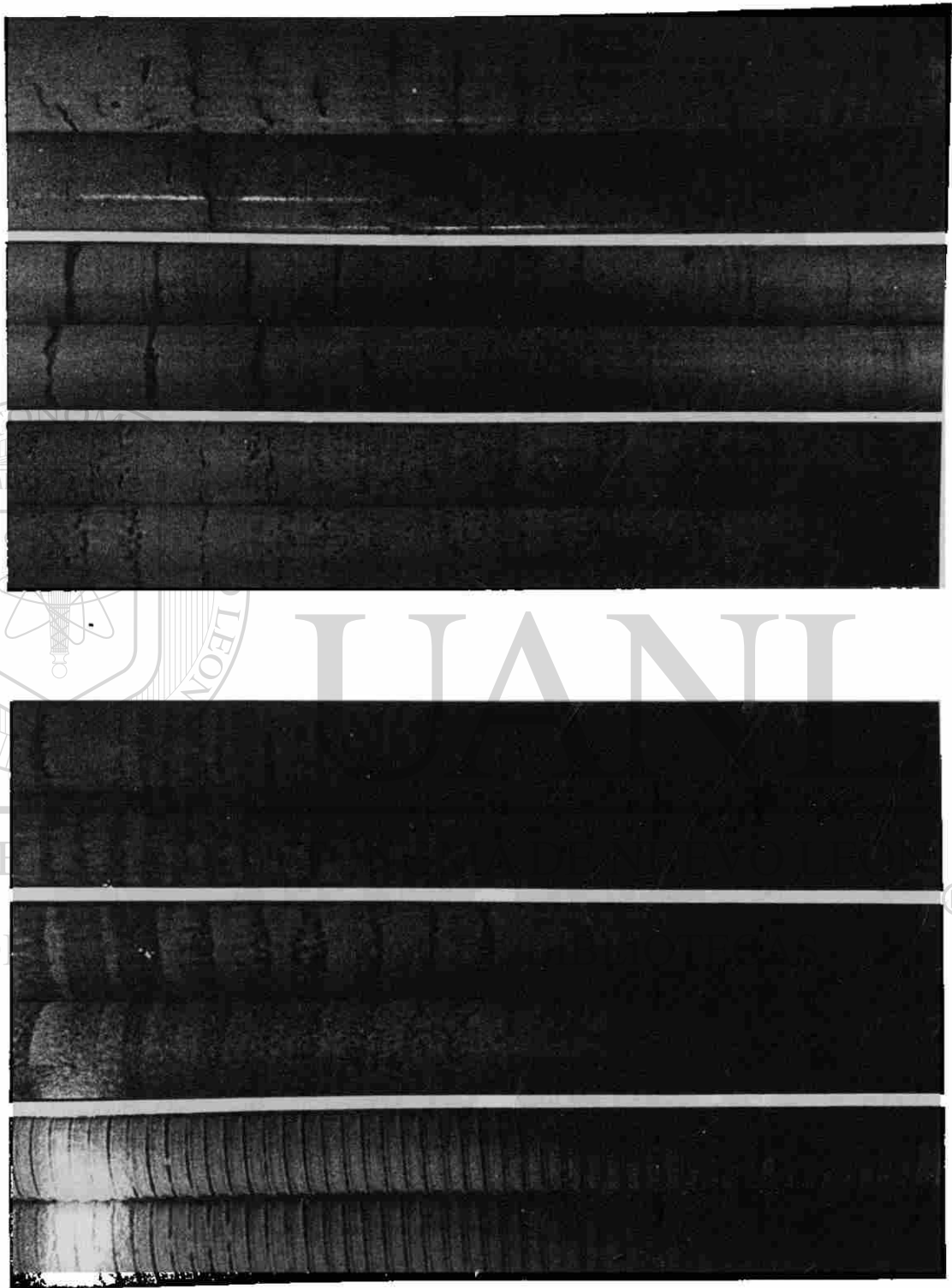


Figura 17. Patrón de depósitos en la superficie de los rodillos del horno de templado encontrados después de 6 meses de operación (Dic. 89).

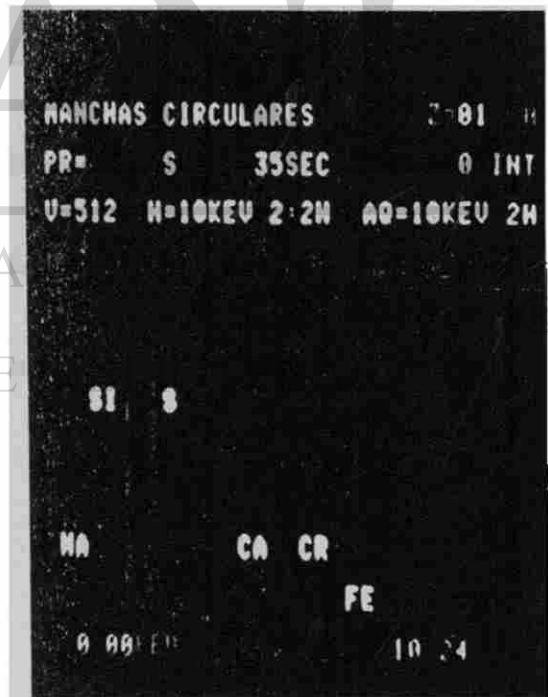
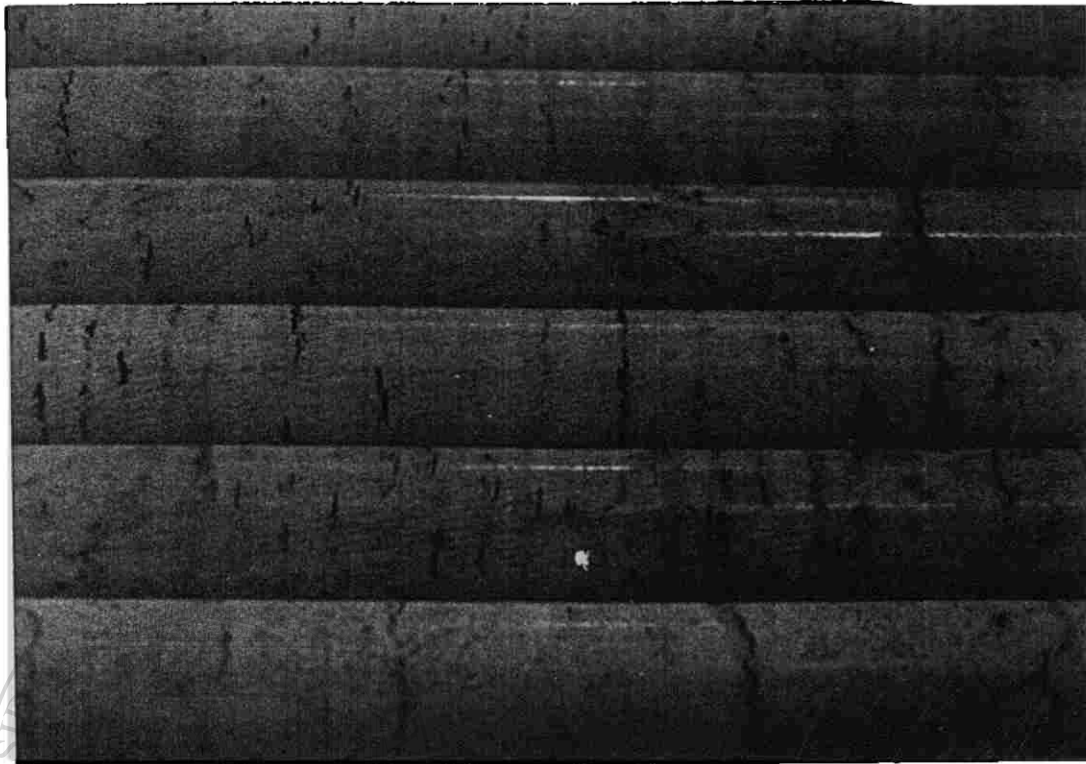


Figura 18. Análisis elemental de los depósitos encontrados en los rodillos, resultando estar constituidos por S, Na, Si, Ca (vidrio y polvo del ambiente) y cantidades menores de Fe y Cr.

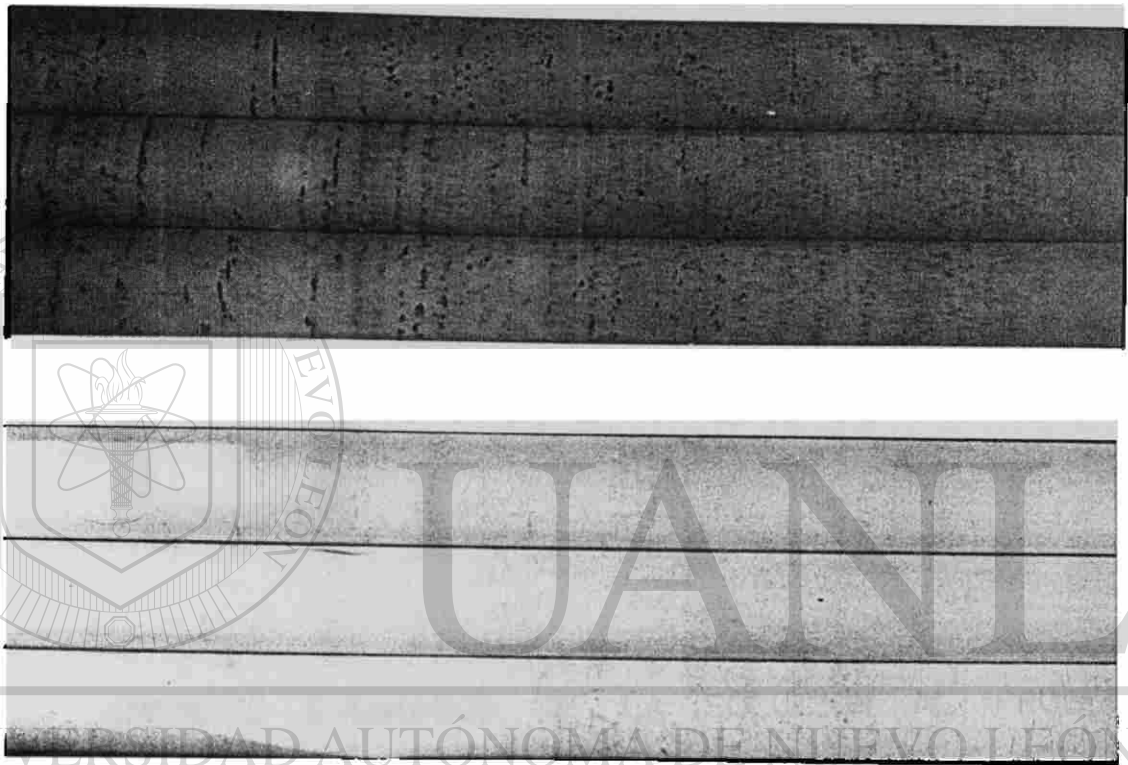
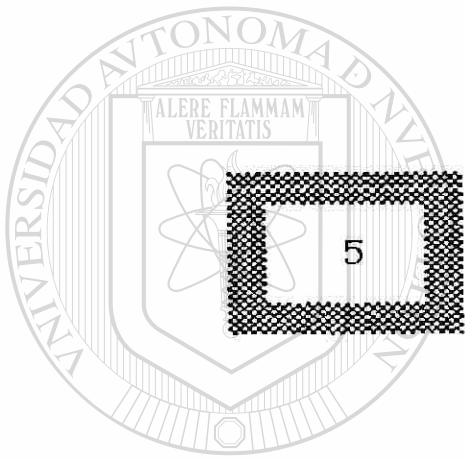


Figura 19. Pruebas de limpieza de rodillos utilizando solamente el sistema agua desmineralizada / vapor.



UANL

IMPACTO ECONOMICO DE LA SOLUCION AL PROBLEMA
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
DE RAYABILIDAD DEL VIDRIO TEMPLADO



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En la tabla siguiente se indican los beneficios obtenidos por la empresa al solucionarse el problema de rayabilidad del vidrio templado. Como se muestra, el costo del proyecto fué de alrededor de \$ 65'000,000 con duración de 14 meses. En cuanto al proceso, se implementó un sistema de retención de sólidos en suspensión como paso final del proceso de tratamiento de agua, con lo que aunado al aumento de eficiencia de lavadora se produce un aumento en la calidad del producto al abatir el problema de rayabilidad.

Mediante la implementación del método de limpieza de rodillos transportadores de vidrio en el horno de templado se reduce el riesgo de contaminación de partículas de sílica así como el deterioro que éstos sufren con el tiempo, alargando en consecuencia su vida útil.

Quizá el beneficio económico más fuerte y al mismo tiempo "visible", es el eliminar la prueba de la rayabilidad cuyo costo (suponiendo 4 vidrios/hr/día) resulta mayor a 1,500 millones de pesos al año. Anteriormente los vidrios templados que eran sometidos a la prueba de rayabilidad eran desechados por el daño causado en su superficie durante la prueba, actualmente con niveles de rayabilidad de prácticamente de cero los vidrios pueden empacarse después de la prueba y ser vendidos.

COSTO DEL PROYECTO : \$ 65'000,000

DURACION : 14 MESES

PROCESO

ACCION

BENEFICIO

- | | |
|--|---|
| - AUMENTO DE EFICIENCIA DE LAVADORAS ... | CALIDAD DE PRODUCTO |
| - ELIMINACION DE PRUEBA DE RAYABILIDAD ... | COSTO DE PRUEBA (MAS DE 1,500 MILLONES POR AÑO). |
| - METODO DE LIMPIEZA DE RODILLOS ... | ALARGA VIDA UTIL DE LOS RODILLOS DE SILICA. |
| - SISTEMA DE FILTRACION DE SÓLIDOS EN SUSPENSION ... | CALIDAD DE PRODUCTO |

PRODUCTO

SE PRODUCE VIDRIO TEMPLADO DE MAXIMA CALIDAD SUPERFICIAL

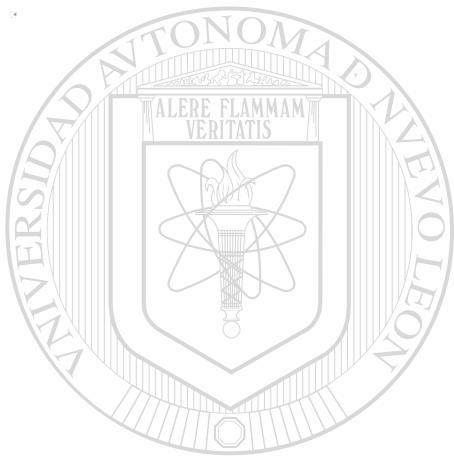
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

MERCADO

- ASEGURAMIENTO DE CLIENTES EN PELIGRO DE PERDERSE .
- CAPACIDAD DE EXPANSIÓN DE MERCADO EN BASE A QUE SE PUEDE OFRECER UN PRODUCTO ALTAMENTE COMPETITIVO.

Tabla 1. Impacto del proyecto en el proceso, producto y mercado de la empresa de vidrio templado.

Al abatir el problema de rayabilidad se produce un vidrio templado de máxima calidad superficial. Esto permite a la empresa, asegurar a los clientes que estaban en peligro de perderse así como la posibilidad de aumentar se mercado en base a que se puede ofrecer un producto altamente competitivo.

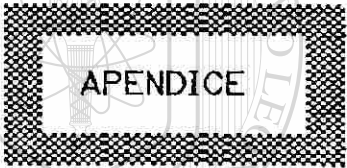
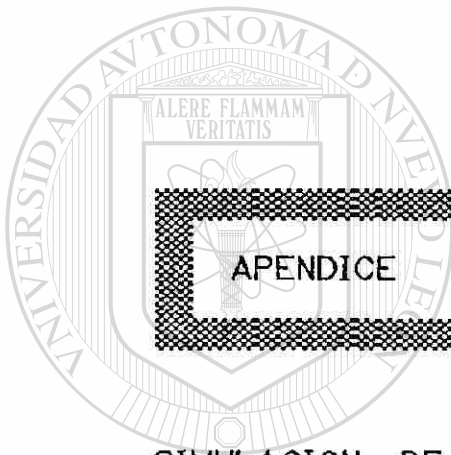


UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



UANL

SIMULACION DE ESFUERZOS RESIDUALES DURANTE EL

TEMPLADO DE VIDRIO PLANO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

PROGRAM ELASTICIDAD;

CONST

PI = 3.1416;
E = 6.7E+10 ; NU = 0.22 ;

VAR

SUM1 , SUM2, DT, DX, KAPA, V, L, AUX, TO, C1, C2, I1, I2, DILAT, S, Y, YY, DDT : I
T, X, N, DIVX, DIVT : INTEGER;
TEMP, VIS, EPP, EP, SIGTER, SIGRES, SIGTOT : ARRAY[0..30] OF REAL;
PR : TEXT;

PROCEDURE DATIN;

BEGIN;
ASSIGN(PR, 'PLAS2.TEX'); REWRITE(PR);
V := -575;
TO := 550;
L := 0.3/2;
KAPA := 0.0058;
DIVX := 30;
DIVT := 20;
DX := L/DIVX;
DT := 0.05;
FOR X := 0 TO DIVX DO
BEGIN;
TEMP[X] := TO; VIS[X] := 0 ; EPP[X] := 0; EP[X] := 0; SIGTER[X] := 0
SIGRES[X] := 0; SIGTOT[X] := 0;
END;
C1 := E/(1-NU); C2 := 2*(2*L) ;
END;

PROCEDURE PANT1;

BEGIN; CLRSCR;
GOTOXY(15,1); WRITELN('--- TERMOELASTOPLASTICIDAD UNIDIMENSIONAL

```

GOTOXYC 10,4);WRITELN('TIEMPO : ');
GOTOXYC 10,6);WRITELN('POSICION : ');
GOTOXYC 10,8);WRITELN('TEMPERATURA : ');
GOTOXYC 10,9);WRITELN('VISCOSIDAD : ');
GOTOXYC 10,10);WRITELN('DEF. PLASTICA : ');
GOTOXYC 10,11);WRITELN('ESF. TERMICO : ');
GOTOXYC 10,12);WRITELN('ESF. RESIDUAL : ');
GOTOXYC 10,14);WRITELN('ESF. TOTAL : ');
END;

```

PROCEDURE TEMPE;

BEGIN;

Y := EXPC - KAPA*PI*PI*T*DT/(4*L*L);

FOR X:=0 TO DIVX DO

begin;

GOTOXYC(1,1);WRITELN(X);

S:=1; N:=0; YY:=5*Y; SUM1:=0;

WHILE YY/Y > 0.000000001 DO

BEGIN;

YY:=1/(2*N+1)*EXPC-KAPA*SQRC(2*N+1)*PI/(2*L)*T*DT);

SUM1:=SUM1+S*YY*COS((2*N+1)*PI*X*DX/(2*L)); S:=-S,
gotoxy(1,2);writeLn(N);

N:=N+1;

END;

TEMP(X):=V-4*V/PI*SUM1+TO;

END;

END;

PROCEDURE ESFUERZOS;

BEGIN; I1:=0; I2:=0;

FOR X:=0 TO DIVX DO

BEGIN;

IF (X=0) OR (X=DIVX) THEN

BEGIN; I1:=I1+DILAT*TEMP(X)*DX/2;

I2:=I2+EP(X)*DX/2; END

```

ELSE
  BEGIN; I1 := I1 + DILAT*TEMP[X]*DX; I2 := I2 + EP[X]*I
END;
FOR X:=0 TO DIVX DO
  BEGIN;
  DILAT := ( 52.0 + 0.015*TEMP[X] ) * 1E-7;
  SIGTER[X] := C1 * ( C2 * I1 - DILAT * TEMP[X] );
  SIGRES[X] := C1 * ( C2 * I2 - EP[X] );
  SIGTOT[X] := SIGTER[X] + SIGRES[X] ;
  IF TEMP[0] < 300 THEN BEGIN; CLRSCR; GOTOXY(10,10);
  WRITELN( ' TERMINE ' ); END;
  IF TEMP[X] < 300 THEN VIS[X] := 1E+20
  ELSE VIS[X] := EXPC ( -4.726415 + 6671.9 / (TEMP[X] - 107) ) * LNC
  EP[X] := EP[X] + SIGTOT[X] * DT / (6 * VIS[X]);
  EPP[X] := SIGTER[X] / (6 * VIS[X]);
  GOTOXY(22,6); WRITELN(X);
  GOTOXY(20,4); WRITELN(T * DT, ' ');
  GOTOXY(23,8); WRITELN(TEMP[X]:1:4, ' ');
  GOTOXY(24,9); WRITELN(VIS[X]:1:4, ' ');
  GOTOXY(27,10); WRITELN(EP[X]:1:5);
  GOTOXY(27,11); WRITELN(SIGTER[X]:1:4);
  GOTOXY(27,12); WRITELN(SIGRES[X]:1:4);
  GOTOXY(27,14); WRITELN(SIGTOT[X] / 1E+6:1:3, ' ');
  END;

```

END;

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

PROCEDURE REGISTRO;

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

BEGIN;

WRITELN(PR, T * DT: 1: 5);

FOR X:=0 TO DIVX DO

BEGIN;

WRITELN(PR, X: 2, ' ', TEMP[X]: 4: 2, ' ', EP[X]: 2: 5, ' ', SIGTE
, ' ', SIGRES[X] / 1E+6: 1: 2, ' ', SIGTOT[X] / 1E+6: 1: 2, ' ', EPP[

END;

WRITELN(PR);

END;

BEGIN;


```
PANT1;  
DATIN;  
ESFUERZOS; REGISTRO;  
FOR I: =1 TO DIVT DO  
BEGIN;  
    TEMPE;  
    ESFUERZOS;  
    IF T = 2*TRUNC(T/2) THEN REGISTRO;  
END;
```

END.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

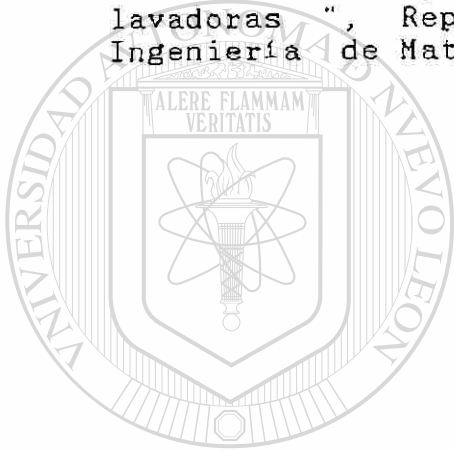


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

REFERENCIAS

- 1 - José María Fernández Navarro , El Vidrio, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto de Cerámica y Vidrio, 1985.
- 2 - Heinz G. Pfaender, Schott guide to glass, Van Nostrand Reinhold Company, England, 1983.
- 3 - George W. McLellan, E. B. Shand, Glass Engineering Handbook, Mc-Graw-Hill, U.S.A., 1984.
- 4 - George W. Scherer, Relaxation in Glass and Composites, John Wiley y Sons, Inc. , New York, 1986.
- 5 - R.W. Lardner, Mathematical theory of dislocations and fracture. University of Toronto Press, Great Britain, 1974.
- 6 - H.S. Carslaw and J.C. Jeager, Conduction of heat in Solids, Oxford University Press, Great Britain, 1976.
- 7 - " Deterioro Superficial de rodillos de Sílica fundida ", Reporte interno, DIM/12/02/-031, Doctorado en Ingeniería de Materiales, U.A.N.L., Julio 1989.
- 8 - " Caracterización superficial de vidrios Aleta y Cougar mediante SEM", Reporte interno DIM/12/03-32, Doctorado en Ingeniería de Materiales, U.A.N.L., Agosto 1989.
- 9 - " Contaminación ambiental en planta ", Reporte interno DIM/12/04/34, Doctorado en Ingeniería de Materiales, U.A.N.L., Agosto 1989.
- 10 - " Análisis de Superficie de vidrios cougar lavados en planta y en planta México ", Reporte interno, DIM/12/05/35, Doctorado en Ingeniería de Materiales, U.A.N.L. , Agosto 1989.
- 11 - " Análisis de Superficie de vidrios de alta y baja rayabilidad ", Reporte interno, DIM/12/06/37, Doctorado en Ingeniería de Materiales, U.A.N.L. , Septiembre 1989.
- 12 - " Análisis de escoriaciones en vidrio templado ", Reporte interno, DIM/12/07/038, Doctorado en Ingeniería de Materiales, U.A.N.L., Septiembre 1989.
- 13 - " Determinación de Sólidos en suspensión en agua suministrada a lavadoras de vidrio plano ", Reporte Interno, DIM/12/08/45, Doctorado en Ingeniería de Materiales, U.A.N.L. , Septiembre 1989.

- 14 - " Comparación de sólidos suspendidos en Agua-Parabrisas y Agua-Vidrio Templado " , Reporte Interno, DIM/12/10-051, Doctorado en Ingeniería de Materiales, U.A.N.L., Octubre 1989.
- 15 - " Evaluación de filtro Americano " , Reporte interno, DIM/12/12-063, Doctorado en Ingeniería de Materiales, U.A.N.L., Noviembre 1989.
- 16 - " Método de limpieza de rodillos " , Reporte interno, DIM/12/13-071, Doctorado en Ingeniería de Materiales, U.A.N.L., Diciembre 1989
- 17 - " Evaluación comparativa de filtros del sistema de agua de lavadoras " , Reporte interno, DIM/12/17/096, Doctorado en Ingeniería de Materiales, U.A.N.L., Febrero de 1990.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

