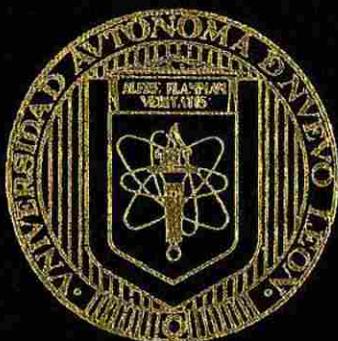


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS



ESTUDIO DEL EFECTO DEL TAMAÑO DE GRANO DE LA  
ARENA SILICA EN LA FORMACION DE INCLUSIONES  
GASEOSAS EN LA PRODUCCION DE VIDRIO CALIZO

POR:

JUAN FRANCISCO MENDEZ BAEZ

Como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRIA EN CIENCIAS con especialidad en  
INGENIERIA CERAMICA

FEBRERO DE 2000

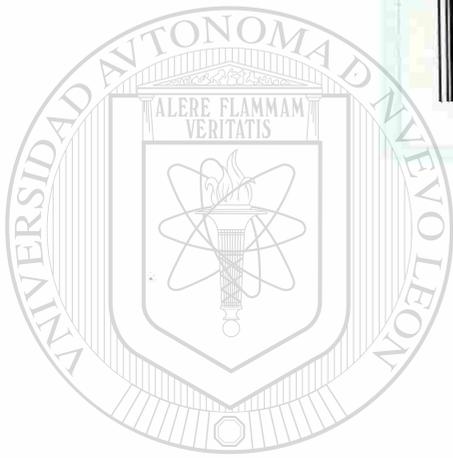
TM

Z5521

FCQ

2000

M4



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**



**ESTUDIO DEL EFECTO DEL TAMAÑO DE GRANO DE LA ARENA SÍLICA**

**EN LA FORMACIÓN DE INCLUSIONES GASEOSAS**

**EN LA PRODUCCIÓN DE VIDRIO CALIZO**

**DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS**  
Por

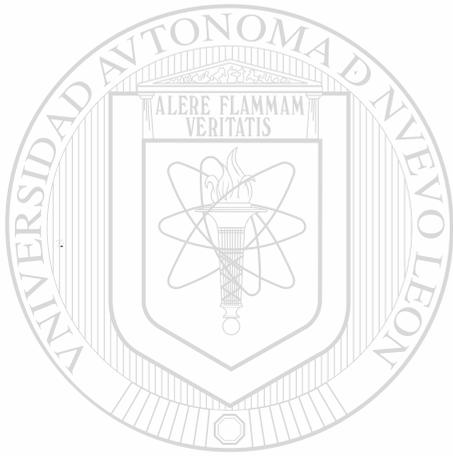
**JUAN FRANCISCO MÉNDEZ BÁEZ**

**Como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRÍA EN CIENCIAS con Especialidad en  
Ingeniería Cerámica**

**Febrero, 2000**

TM  
200  
M4

0133-68260



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



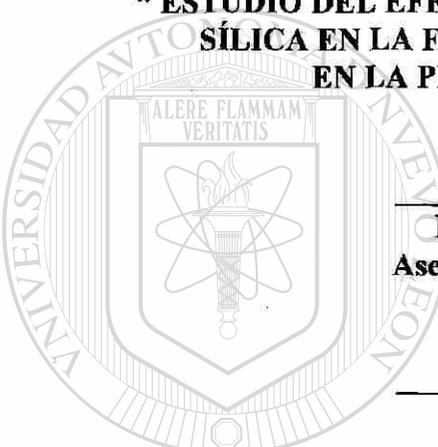
FONDO  
TESIS

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES**

**Responsable y Fundadora del Programa UNI – VITRO  
Dra. Leticia M. Torres Guerra  
Subdirectora de Investigación**

**Aprobación de tesis:**

**“ ESTUDIO DEL EFECTO DEL TAMAÑO DE GRANO DE LA ARENA  
SÍLICA EN LA FORMACIÓN DE INCLUSIONES GASEOSAS  
EN LA PRODUCCIÓN DE VIDRIO CALIZO ”**



**M.C. Alejandro García García  
Asesor, Director de tesis y Presidente**

**M.C. Antonio López Reyes  
Co-asesor y Secretario**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS**

**Dr. Luis Carlos Torres González  
Revisor, Sinodal y Vocal**

**Dr. Antonio Fernández Fuentes  
Revisor y Suplente**

**M.C. Martha A. Suárez Herrera  
Coordinadora de la Escuela de Graduados  
en Ciencias**

**Febrero del 2000**

## AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento al M.C. Alejandro García García, y al M.C. Antonio López Reyes, por sus conocimientos y consejos transmitidos a lo largo de este tiempo, por su disposición y apoyo en todo momento.

Agradezco a la Dra. Leticia M. Torres Guerra por su apoyo, motivación y consejos brindados.

Agradezco a el Dr. Luis Carlos Torres González y al Dr. Antonio Fernández Fuentes por sus conocimientos y atenciones brindados.

Agradezco a el Lic. Jorge Loredó Murphy por su constante ayuda y colaboración.

Agradezco a VITROCRISA por depositar su confianza en mi, y apoyarme en mi desarrollo profesional.

Agradezco al Ing. Sergio Alanis V. y al Ing. Juan M. Alarcón M. por las facilidades brindadas para la realización de este trabajo.

Agradezco de manera muy especial a mis compañeros de trabajo por su apoyo y colaboración en todo momento.

**DEDICATORIA**

**A DIOS**

**A MIS PADRES**

**JUAN MANUEL MÉNDEZ CÁZARES†  
Y  
BLANCA AURORA BÁEZ DE MÉNDEZ  
QUIENES ME HAN DADO TODO LO QUE HE NECESITADO**

**ESPECIALMENTE A**

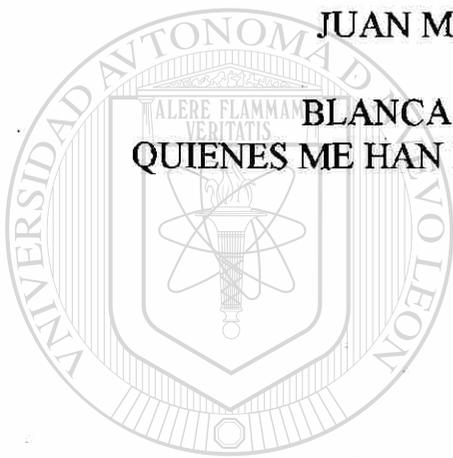
**MI ESPOSA**

**ROSALINDA ARELLANO V.**

**Y A MI HIJA**

**NATHALI J. MENDEZ A.**

**QUIENES SON LA RAZÓN DE MI VIDA**



**UANL**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

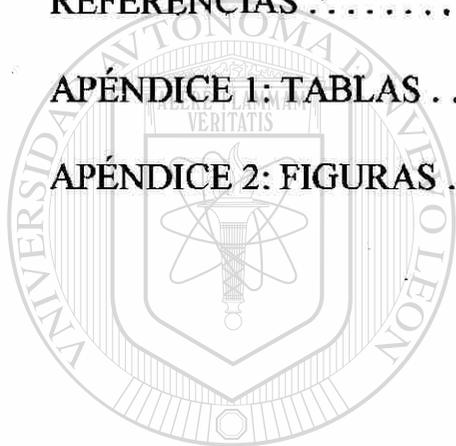
**DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS**



# ÍNDICE GENERAL

	Página
RESUMEN .....	1
CAPÍTULO 1 .....	4
INTRODUCCIÓN .....	5
1.1 Generalidades .....	5
CAPÍTULO 2 .....	25
FUNDAMENTOS .....	26
CAPÍTULO 3 .....	35
DISEÑO DE EXPERIMENTOS .....	36
CAPÍTULO 4 .....	39
<hr/>	
EXPERIMENTACIÓN .....	40
4.1 Materias primas .....	40
4.2 Formulación de mezcla .....	43
4.3 Preparación de mezcla .....	45
4.3.1 Pesaje .....	45
4.3.2 Homogeneización de mezcla .....	46
4.4 Fusión .....	46
4.5 Determinación del número de burbujas .....	51
CAPÍTULO 5 .....	53
RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	54
5.1 Resultados .....	54

	Página
CAPÍTULO 6 .....	58
DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	59
6.1 Discusión .....	59
CAPÍTULO 7 .....	69
CONCLUSIONES .....	70
7.1 Conclusiones .....	70
REFERENCIAS .....	72
APÉNDICE 1: TABLAS .....	76
APÉNDICE 2: FIGURAS .....	78



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

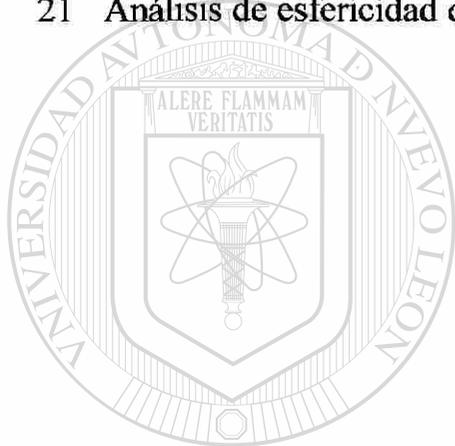


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1 Niveles de burbuja permitidos en productos de vidrio comerciales. . . . .	6
2 Función de la materia prima en el vidrio. . . . .	27
3 Definición del tamaño de grano de arena sílica como fino, medio, y grueso. . . . .	33
4 Variables y niveles de la experimentación. . . . .	36
5 Diseño 1 de experimentos. . . . .	37
6 Experimentos del diseño 1. . . . .	37
7 Diseño 2 de experimentos. . . . .	38
8 Experimentos del diseño 2. . . . .	38
<hr/>	
9 Óxidos de vidrio a experimentar. . . . .	44
10 Materia prima de mezcla vitrificable de experimento. . . . .	44
11 Matriz de mezclas vitrificables de experimentación. . . . .	45
12 Factores y niveles del diseño 1 de experimentos. . . . .	54
13 Resultados experimentales del diseño 1 de experimentos. . . . .	55
14 Matriz experimental 1 con los valores de respuesta. . . . .	55
15 Factores y niveles del diseño 2 de experimentos. . . . .	56
16 Resultados experimentales del diseño 2 de experimentos. . . . .	56

17	Matriz experimental 2 con los valores de respuesta. . . . .	57
18	Resultados globales experimentales de la corrida 1 y la réplica. . . . .	63
19	Disminución de burbuja al incrementar temperatura de fusión de 1400°C a 1450°C, para un determinado tiempo de fusión. . . . .	65
20	Disminución de burbuja al incrementar el tiempo de fusión de 3 a 6 horas, para una determinada temperatura de fusión. . . . .	66
21	Análisis de esfericidad del grano de arena sílica . . . . .	77



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

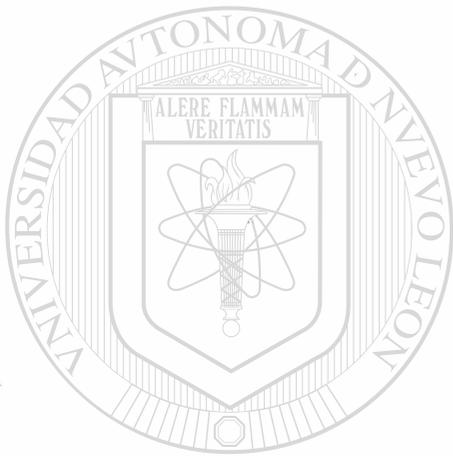
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1	Tiempo requerido para obtener una fusión libre de burbujas, y una fusión libre de mezcla, para mezclas de vidrio con la misma composición, variando los tamaños de grano. . . . . 11
2	Regresión lineal del número de burbujas centímetro cúbico para fusiones hechas con arena de 0.095 mm de tamaño de grano. . . . . 12
3	Regresión lineal del número de burbujas por centímetro cúbico para fusiones hechas con arena de 0.34 mm de tamaño de grano. . . . . 13
4	Efecto del tamaño de grano en el tiempo de fusión. . . . . 14
5	Efecto en el tiempo de fusión variando el tamaño de grano de la arena. . . . 14
6	Relación entre la velocidad de fusión y la temperatura de una mezcla estándar, conteniendo diferentes tamaños de grano de arena. . . . . 15
7	Comparación de las velocidades de fusión de mezclas estándar conteniendo arenas de diferente tamaño de grano. . . . . 16
8	Análisis termogravimérico de mezcla de vidrio calizo, con distribuciones de partícula de <53, 125 a 180, y 425 a 500 $\mu\text{m}$ . . . . . 30
9	Comparación de fases identificadas de mezclas con diferentes distribuciones de partícula. . . . . 31
10	Imagen de arena sílica OK100 a 32x. . . . . 41
11	Imagen de arena Lampazos VC a 32x. . . . . 41
12	Imagen de arena San José -40+50. . . . . 42

Figura	Página
13 Revolvedora de laboratorio de mezcla. ....	46
14 Vista frontal de horno de fundición de laboratorio. ....	47
15 Sistema de control de temperatura de horno de laboratorio. ....	48
16 Sistema de combustión de horno de laboratorio. ....	48
17 Medición de temperatura de fusión. ....	49
18 Proceso de vaciado de vidrio. ....	50
19 Equipo contador de colonias. ....	51
20 Muestra de vidrio montada sobre el contador de colonias. ....	52
21 Gráfica media marginal del diseño de experimentos 1. ....	59
22 Gráfica media marginal del diseño de experimentos 2. ....	61
23 Gráfica de resultados experimentales de la corrida 1. ....	64
24 Gráfica de resultados experimentales de la réplica. ....	65
25 Granulometría de arena sílica OK100. ....	79 <sup>®</sup>
26 Granulometría de arena sílica Lampazos VC. ....	80
27 Granulometría de arena sílica San José -40+50. ....	81
28 Granulometría de feldespatos San José. ....	82
29 Granulometría de dolomita. ....	83
30 Granulometría de carbonato de sodio. ....	84
31 Granulometría de calcita. ....	85



**RESUMEN**

UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

## RESUMEN

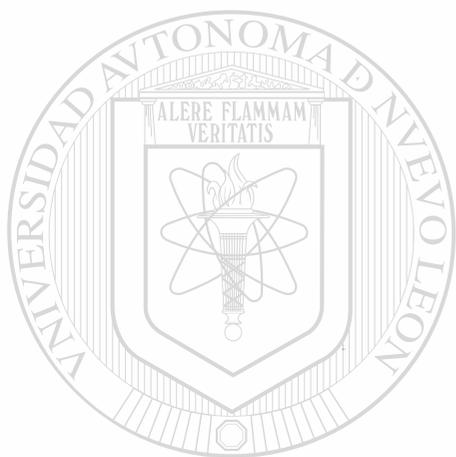
En este trabajo de tesis se estudia el efecto del tamaño de grano de la arena sílica en la formación de oclusiones gaseosas en la producción de vidrio. A esta oclusión se conoce como burbuja, siendo un defecto que demerita la calidad del vidrio.

Para la experimentación se seleccionaron tres arenas que se consumen en el grupo VITRO, siendo estas: la arena sílica OK100, la arena sílica Lampazos VC, y la arena sílica San José en su fracción -40+50, que corresponden a tamaños promedio de grano de 109  $\mu\text{m}$ , 218  $\mu\text{m}$ , y 362  $\mu\text{m}$  respectivamente.

Se consideró estudiar el efecto del tamaño de grano de la arena sílica en la formación de burbuja en la producción del vidrio calizo producido por la planta VITROCRISA, el cual es un vidrio dirigido a la fabricación de artículos de mesa en manufactura que cuenta con proceso prensa sople de alta velocidad.

En la realización de la experimentación se simuló a nivel laboratorio el proceso de producción de vidrio. Las mezclas vitrificables para producir el vidrio con las diferentes arenas, se fundieron sobre crisoles de refractario en un horno de laboratorio de combustión gas aire, a diferentes temperaturas y a diferentes tiempos de fusión. A los vidrios obtenidos se les determinó la cantidad de burbuja remanente y se refirió a la masa de vidrio.

El logro obtenido en este estudio fue de encontrar que el tamaño de grano de la arena sílica tiene efecto en la formación de burbujas en el vidrio, siendo este tal que utilizando la arenas de tamaño promedio de 109  $\mu\text{m}$  y 218  $\mu\text{m}$  se produce menor cantidad de burbuja que utilizando la arena con un tamaño de 362  $\mu\text{m}$ . Esto podrá ayudar a la toma de decisiones en la selección de la arena sílica a usar en la producción de vidrio en la empresa.



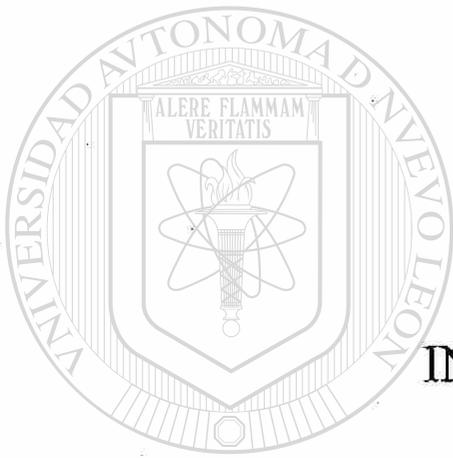
# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



# CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## INTRODUCCIÓN

### 1.1 GENERALIDADES

Uno de los principales problemas a que se ha enfrentado la industria del vidrio en la producción del mismo ha sido la presencia de burbujas en el producto final; dichas oclusiones gaseosas se consideran como atributo del artículo cuya aparición demerita la calidad cosmética y estructural del vidrio. En el ambiente de la fabricación de vidrio a este defecto se le conoce con varios nombres dependiendo de su tamaño. Así, si el diámetro de la oclusión gaseosa que se presenta en el artículo es mayor a 2 mm se le denomina burbuja grande, si es entre 1 y 2 mm se le denomina intermedia, si mide entre 0.5 y 1 mm burbuja pequeña, y si mide menos de 0.5 mm se le conoce como semilla(1).

### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Las tolerancias de aceptación de burbujas en un producto de vidrio varían dependiendo del tipo de vidrio, el uso al que va a estar sometido, y el mercado a donde va dirigido. Así pues, se tolera un número diferente de burbujas en la producción de envases de vidrio, en vidrio plano, vidrio industrial y vidrio para artículos de mesa. En la tabla 1 se muestran los niveles de aceptación de burbuja de los productos más comunes.

Sin embargo en los artículos de mesa e industrial que se fabrican en VITROCRISA, el nivel de exigencia de los mercados nacional y extranjero hacia la mejora de la calidad del vidrio está siendo cada vez mayor, llegando a solicitar artículos como copas y tapas de medidor de consumo eléctrico, con un máximo de una sola burbuja en el artículo, esto se traduce en un nivel de 0.1 burbujas por onza, cuando el nivel de burbuja establecido para este tipo de vidrio es de 10 burbujas por onza.

Tabla 1. Niveles de burbuja permitidos en productos de vidrio comerciales.

APLICACIÓN	NIVEL DE BURBUJA PERMITIDA (#burb/oz)
Envase genérico	50
Envase de perfumería	10
Flotado automotriz	0.0006
Artículo de mesa	40
Artículo de mesa fino	10
Cristal de plomo	0.0025

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Dado que se producen gases en las reacciones de la mezcla, es común encontrar burbujas en el producto final. Las burbujas son oclusiones gaseosas atrapadas en la masa altamente viscosa de vidrio. En la práctica industrial se determina que un vidrio está bien fundido cuando se encuentra libre de materia prima cristalina, y se determina que un vidrio está bien refinado cuando se encuentra libre de burbuja en una tolerancia definida de acuerdo a la tabla 1.

El vidrio se clasifica de acuerdo a su composición química en : vidrio calizo, vidrio borosilicato, vidrio de plomo, vidrio de sílica pura, y vidrio aluminosilicato. El estudio presente se dirige al vidrio calizo el cual se produce en VITROCRISA, siendo aquel que está formado principalmente por  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ , en una proporción aproximada de 74%  $\text{SiO}_2$ , 10%  $\text{CaO}$ , 16%  $\text{Na}_2\text{O}$ .

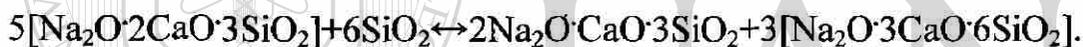
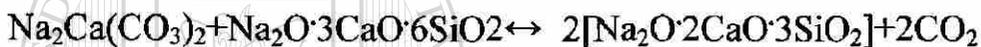
El proceso de la fusión de vidrio observado desde un punto de vista macroscópico puede ser dividido en tres etapas, una es la propia fusión en donde se producen las reacciones químicas de la mezcla para formarse un líquido libre de cristales de materia prima sin disolver. La segunda etapa llamada refinación ó afinación, es donde se eliminan las burbujas remanentes en el vidrio cuando las reacciones han terminado. Y la tercera etapa, llamada homogeneización, se refiere a la uniformidad de las propiedades físicas y químicas de todo el vidrio fundido.

Doyle(2) y Tooley(3) proponen que durante la preparación del vidrio se presentan las siguientes reacciones:

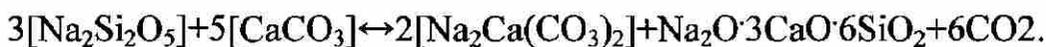
- 1.- Evaporación del agua libre de los componentes de la mezcla.
- 2.- Formación y pérdida de constituyentes gaseosos tales como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ , y  $\text{H}_2\text{O}$ .
- 3.- Formación de fases líquidas de algunos componentes individuales y la formación de mezclas multicomponentes, incluyendo eutécticos.
- 4.- Disolución de las fases líquidas, produciendo vidrio fundido homogéneo libre de material cristalino.
- 5.- Volatilización de los componentes del vidrio y mezcla tales como  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  etc.
- 6.- Disolución de fases gaseosas en el vidrio líquido.

El sistema  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{CO}_2$  es el que ofrece mayor interés desde el punto de vista industrial. La primera reacción ocurre a unos  $600^\circ\text{C}$ , en donde se forma el carbonato doble de sodio y calcio  $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ , que funde a  $813^\circ\text{C}$  y que con carbonato de calcio, forma cristales mixtos, produce el eutéctico  $2\text{CaCO}_3 \cdot 3\text{Na}_2\text{CO}_3$  a  $785^\circ\text{C}$ , que es el primer signo de fusión(4,5).

Dentro del gran número de transformaciones que se presentan en la producción de vidrio, sobresalen las siguientes reacciones(4,5).



Estas reacciones ocurren a una temperatura de  $450^\circ\text{C}$ . Las reacciones siguientes se producen a temperatura más elevada y van acompañadas de una fusión.



En los procedimientos de la planta de producción de vidrio de VITROCRISA las temperaturas de los hornos de fusión fluctúan entre  $1460^\circ\text{C}$  y  $1570^\circ\text{C}$ , en donde el vidrio tiene una viscosidad de  $10^2$  poises(6) y los gases generados *in situ* presentan dificultad para ascender y abandonar la masa vítrea, de tal forma que una parte de estos gases quedan suspendidos en el vidrio, formando las oclusiones gaseosas.

Fernández(7) menciona que las principales fuentes de aportación de gases al vidrio pueden provenir de: la mezcla vitrificable, ya sea por el aire intergranular o por los productos de las reacciones químicas, por los refractarios ya sea por porosidad o por reacciones vidrio-refractario, por contaminaciones de metal o materia orgánica, por fenómenos electroquímicos y por sustancias volátiles. Shelby(8) señala que las burbujas en el vidrio pueden ser formadas por gases atmosféricos atrapados físicamente en la mezcla vitrificable o por la descomposición de los componentes de la mezcla, además menciona que pueden ser formados por reacciones de metales con el vidrio fundido y por la corrosión de refractarios. Woolley(9) señala que las burbujas en el vidrio fundido son generadas por las reacciones de descomposición durante la fusión, por la reacción del vidrio con refractarios, metales y electrodos.

Fernández(10) también señala que la mayor parte de los gases es aportada al vidrio por la mezcla vitrificable, ya sea en forma de humedad, de aire físicamente retenido entre sus componentes, o formando parte de su propia constitución química. Así, junto al oxígeno y nitrógeno del aire, se incorporan anhídrido carbónico y anhídrido sulfúrico procedentes de la descomposición de los carbonatos y sulfatos. Estima la cantidad de gases introducida por cada kilo de mezcla en valores de entre 50 y 200 litros a condiciones normales(10).

En este trabajo se estudia la formación de burbujas en el vidrio que son propiciadas por las materias primas de la mezcla vitrificable. Las otras fuentes de burbuja que se menciona en párrafos anteriores como las burbujas provenientes de reacciones de refractarios, de metales y de contaminantes, no se abordarán, solo se fijará el efecto del refractario utilizando un mismo material en la experimentación.

Noel(11) comenta que la burbuja o semilla puede ser causada por la composición del vidrio y el tipo de materia prima, por ejemplo, en el caso de una arena sílica conteniendo un gran porcentaje de granos menores al tamaño promedio, en donde la cantidad de aire atrapado en los intersticios será pequeña y dificultará su eliminación del vidrio fundido. Y señala que esto también se aplica para el resto de los componentes de la mezcla de materia prima.

Krak(12) hace una síntesis sobre las materias primas para la industria del vidrio, resumiendo: las características de la arena sílica, tales como el tamaño de grano y la forma del grano son de suma importancia para la fusión del vidrio. Se tiene conocimiento en la industria que en base a estos factores, algunas arenas funden más rápido que otras, requiriéndose menor cantidad de energía para obtener el vidrio fundido. También señala que los granos que funden rápidamente son de tamaño intermedio, los granos grandes retardan el proceso de fundido y por otro lado los granos finos pueden causar aglomerados que propicien un mal contacto con los fundentes y se retarde la fusión. Los granos de arena sílica angulares y puntiagudos ofrecen una mayor área de contacto que los granos redondeados ; se piensa en la industria que los granos angulares funden más rápido, sin embargo se ha encontrado que los granos redondeados presentan excelentes resultados. No obstante a nivel industrial se le da mayor importancia al tamaño del grano que a la forma del mismo.

Frolich(13) efectúa una descripción visual mediante un análisis fotográfico de la sílica sin disolverse de un vidrio fundido en donde se varió el tamaño de grano de 0.1 a 0.2 mm hasta 0.5 a 0.6 mm, manteniendo los demás componentes de la mezcla con tamaño constante. Encontró que el residuo de sílica sobre el fundido se incrementa al aumentar el tamaño de grano de la arena sílica. Además al variar el tamaño de grano

de carbonato de sodio y calcita, el efecto es muy pequeño comparado con el efecto de la arena sílica.

Frolich(13) funde mezclas con diferentes tamaños de sílica desde 0.1 a 0.4 mm encuentra que el menor tiempo para obtener un vidrio libre de burbujas se logra con la mezcla conteniendo arena de tamaño de 0.2 mm y que el tiempo para obtener un vidrio libre de materia prima sin fundir se disminuye al disminuir el tamaño de la arena. Sus resultados se muestran en la figura 1.

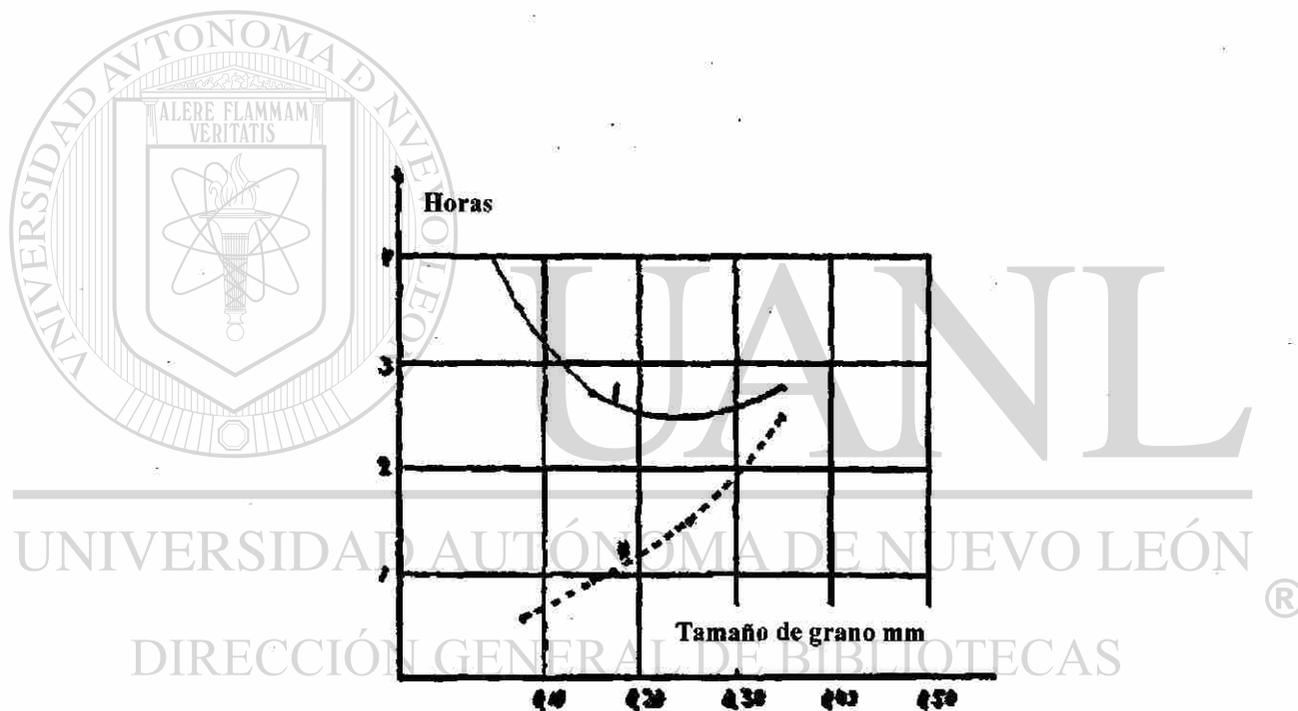


Figura 1. Tiempo requerido para obtener una fusión libre de burbujas (curva I) y una fusión libre de mezcla (curva II) para mezclas de vidrio con la misma composición, variando los tamaños de grano(13).

Manring(14) sugiere que las reacciones del proceso de fusión dependen de la velocidad de calentamiento de la mezcla, del tamaño de partícula de los componentes

de la mezcla, particularmente arenas y soda ash, y de la intimidad del contacto entre los granos durante el mezclado.

Cable(15) funde vidrio calizo usando diferentes tamaños de grano de arena sílica, desde 0.34 a 0.095mm y encuentra que el número de burbujas en los vidrios resultantes decrece exponencialmente con el tiempo; a medida que el tamaño de grano decrece, la semilla resultante, al final de la completa disolución de mezcla, aumenta; sin embargo, la semilla disminuye al final de la refinación. Ver figura 2 y 3.

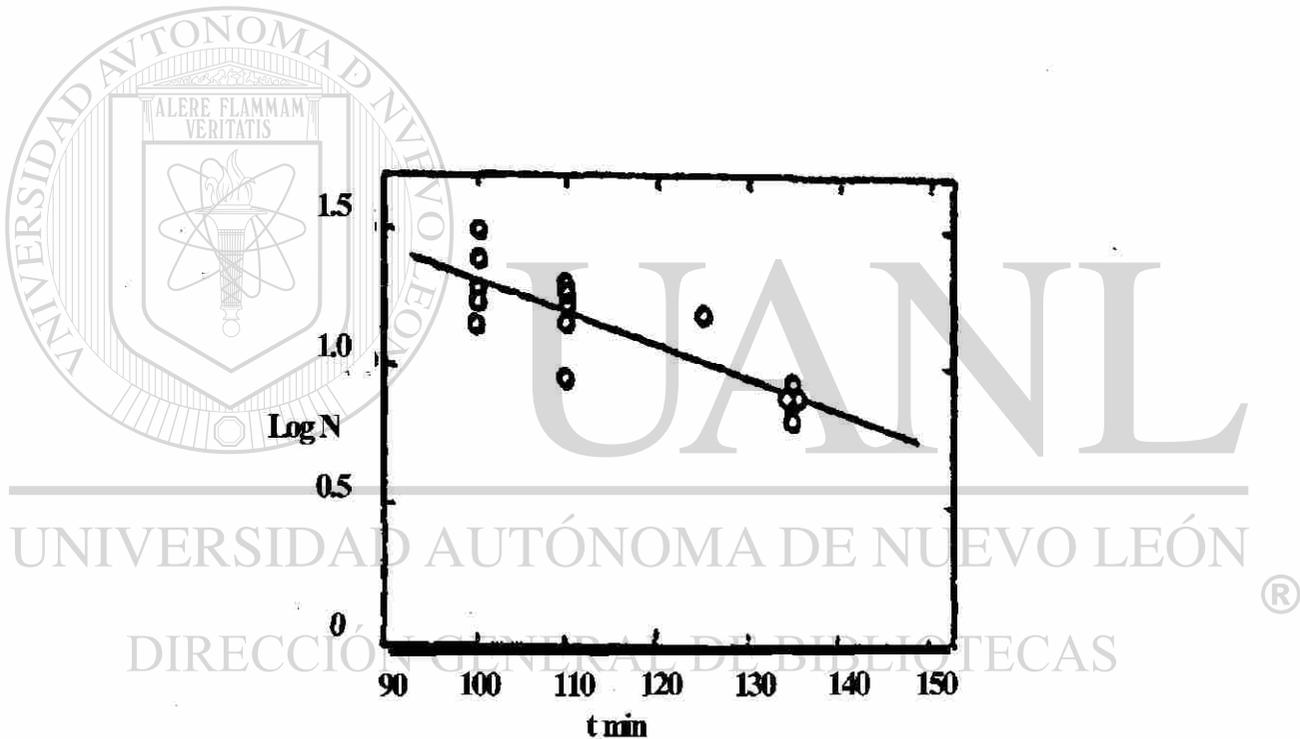


Figura 2. Regresión lineal de #burbujas/cc para fusiones hechas con arena de 0.095mm de tamaño de grano.(15)

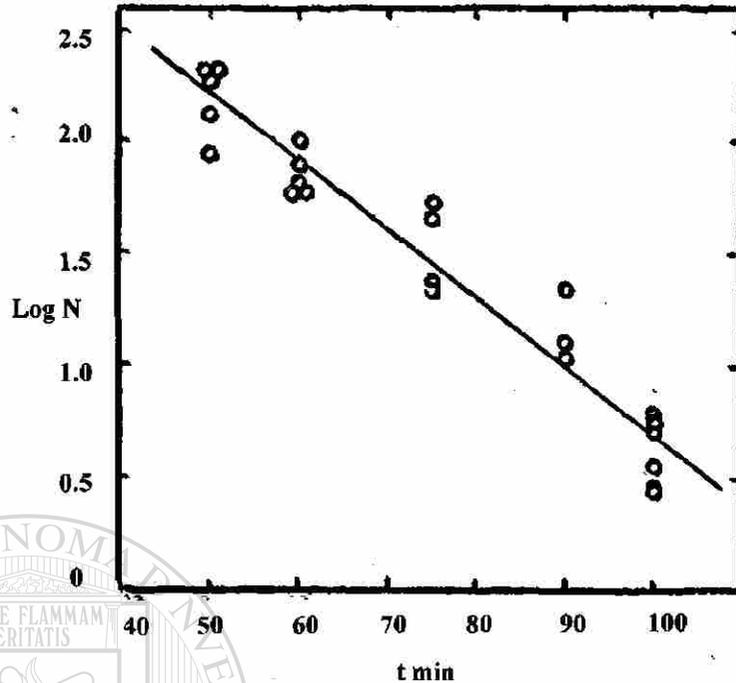


Figura 3. Regresión lineal de #burbujas/cc para fusiones hechas con arena de 0.34mm de tamaño de grano.(15)

Manring(16) comenta que el tiempo requerido para obtener un vidrio libre de mezcla es proporcional al tamaño de grano de la arena sílica.

Potts(17) en su estudio de la influencia del tamaño de grano de la materia prima en la fusión de vidrio calizo concluye que : cuando el tamaño de grano de las materias primas son diferentes entre sí, el tiempo requerido para obtener un vidrio fundido libre de materia prima, aumentará probablemente por la separación de los materiales durante la fusión , y cuando el tamaño de grano de las materias primas es el mismo, se obtiene un vidrio fundido libre de materia prima más rápido, mientras menor es el tamaño de grano. Sus datos se muestran en la figura 4 y 5.

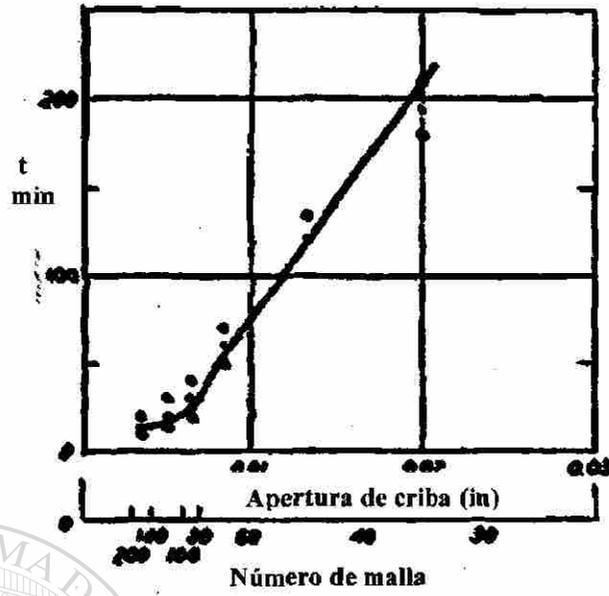


Figura 4. Efecto del tamaño de grano en el tiempo de fusión (arena, carbonato de sodio, y calcita a el mismo tamaño de malla).(17)

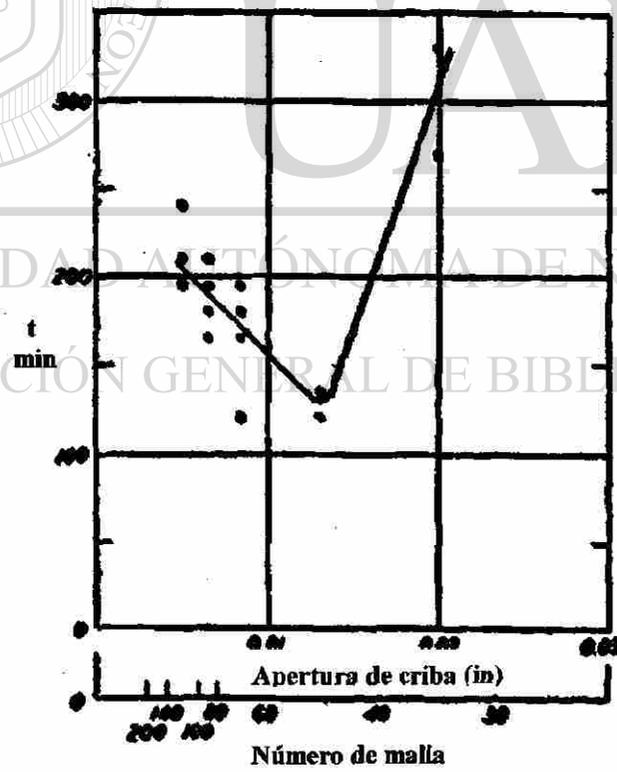


Figura 5. Efecto en el tiempo de fusión variando el tamaño de grano de la arena; 40/60 carbonato de sodio, 40/60 calcita.(17)

Preston y Turner(18) en sus estudios sobre el efecto del tamaño de partícula y la temperatura en la formación de vidrio calizo encuentra que en un rango de 1100°C a 1450°C , la velocidad de fusión de vidrio se duplica al incrementarse la temperatura cada 50°C y que esta velocidad a cualquier temperatura es proporcional al área superficial de los granos de arena sílica. Además resume que el 10 % de la sílica inicial actúa en las reacciones químicas y el restante 90 % se disuelve durante, el tiempo total de fusión a una velocidad de 0.003mm de diámetro de grano por minuto. Sus resultados se muestran en figuras 6 y 7.

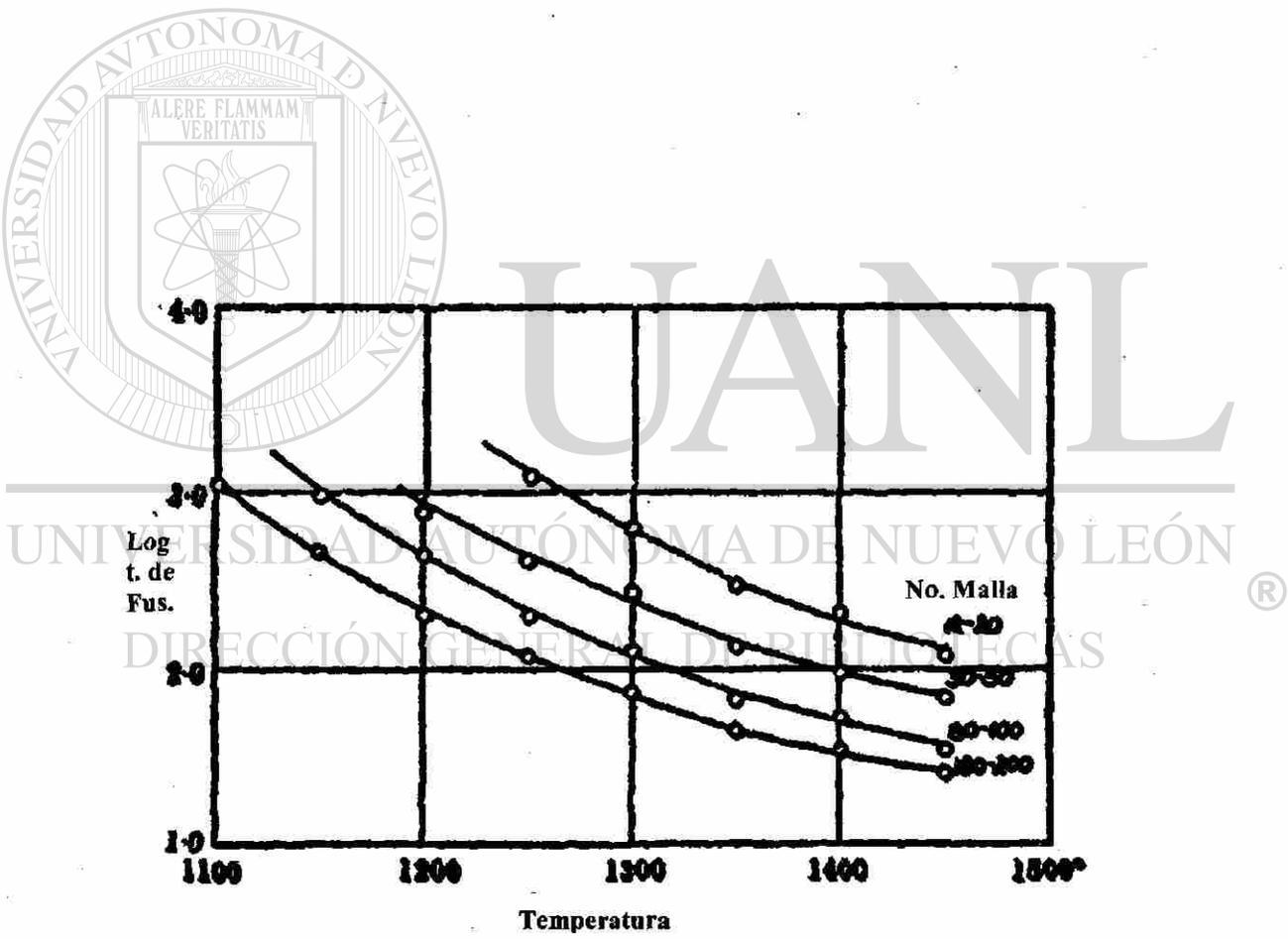


Figura 6. Relación entre el tiempo de fusión y la temperatura de una mezcla estándar conteniendo diferentes tamaños de grano de arena.(18)

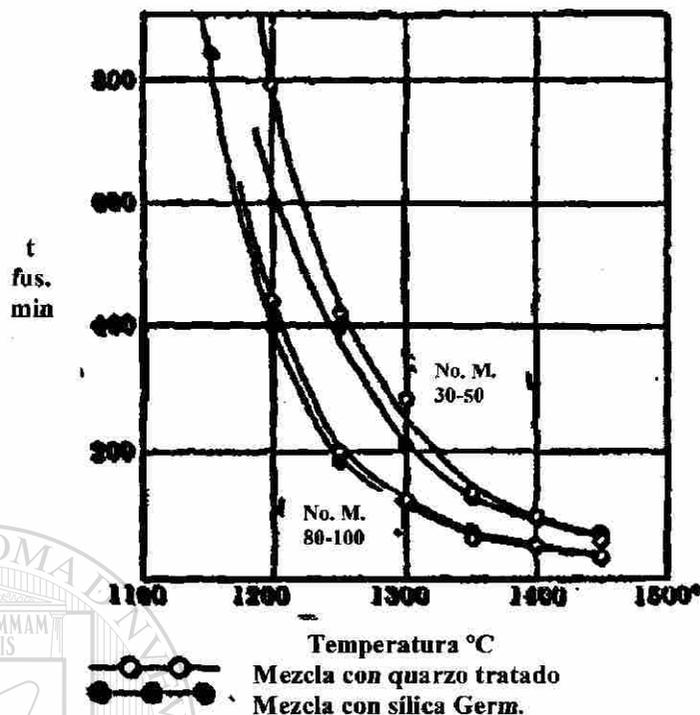


Figura 7. Comparación de las velocidades de fusión de mezclas estándar conteniendo arenas de diferente tamaño de grano.(18)

En los trabajos de las referencias 12, 13, 15, 16, 17, y 18, se estudia la influencia del tamaño de grano de la arena sílica en el proceso de fusión de vidrio, en algunos trabajos el efecto esta dirigido sobre la propia fusión, es decir se acentúa el estudio sobre el efecto de tamaño de grano de la arena sobre el tiempo de fusión en donde toda la materia prima de la mezcla se transforma en vidrio, es decir el tiempo a el cual no se detecta materia cristalina sin disolver. En otras referencias se aborda el efecto del tamaño de grano de la arena sílica sobre el proceso total de la producción de vidrio, abarcando la fusión y la refinación, cuantificando el efecto en base a la cantidad de burbujas remanentes en el vidrio a través del tiempo.

Entre los artículos bibliográficos que abordan el tema en cuestión, dirigiendo el efecto únicamente sobre la fusión, se encuentran Potts(18), Preston y Turner(17),

Manring(16), y Krak(12). En estos trabajos se efectúa experimentación sobre la fusión de vidrio calizo simple, en donde se funden mezclas conteniendo arenas con diferente tamaño de grano, las fusiones se hacen a una determinada temperatura, y se evalúa el efecto en la fusión midiendo el tiempo en el cual toda la materia prima se haya disuelto. Potts(18) trabaja con arena sílica en la mezcla en un rango de 0.127 mm a 0.500 mm, manteniendo los restantes materiales en 0.330 mm, utiliza una temperatura de fusión de 1426 °C , y encuentra un tiempo mínimo de fusión de 125 min, correspondiendo a una arena de tamaño de 0.330 mm. Estos datos concuerdan con los comentarios de Krak(12) que señala que los granos de tamaño intermedio funden más rápido que los granos grandes y que los granos finos, sin llegar a dar datos sobre el respecto. Preston(17) trabaja con un rango de temperatura de 1100 °C a 1500 °C, y con arena en un rango promedio de 1.272 mm a 0.080 mm, encuentra que a cualquier temperatura se obtiene un menor tiempo de fusión utilizando la arena y las restantes materias en un tamaño de 0.080 mm. Manring por su parte trabajando a una temperatura de 1428 °C, fundiendo unicamente arena y carbonato de sodio, encuentra que dentro de un rango promedio de tamaños de 0.512 mm a 0.128 mm, el tiempo mínimo de fusión es para el tamaño promedio de 0.225 mm de arena.

En los trabajos anteriores se presenta una similitud en cuanto a los resultados obtenidos , esta es que el tamaño de grano de la arena sílica tiene efecto en la fusión de vidrio, en los trabajos de Manring, Preston y Krak este efecto estriba en que existe un tamaño óptimo de grano de arena que propicia un tiempo mínimo de fusión de mezcla. Por su parte Preston no encuentra un mínimo tiempo de fusión para su rango de trabajo, solo determina que al disminuir el tamaño de grano de la arena se disminuye el tiempo de fusión. Para Manring y para Potts existe diferencia en el valor del tamaño de grano de la arena para obtener este tiempo mínimo de fusión.

Entre los artículos bibliográficos que abordan el tema en cuestión, tomando en cuenta el efecto total en la fusión y refinación se encuentran Cable(15), y Frolich(13). En estos trabajos se efectúa experimentación sobre la fusión de vidrio calizo simple, en donde se funden mezclas conteniendo arena con diferente tamaño de grano, las fusiones se hacen a una determinada temperatura, y se evalúa el efecto en la fusión midiendo el tiempo en el cual toda la materia prima se haya disuelto, y se evalúa el efecto en la refinación midiendo la cantidad de burbujas remanentes en el vidrio con respecto al tiempo de fusión. Cable(15) trabajando a una temperatura de 1400 °C, utilizando arenas en un rango de 0.095 mm a 0.34 mm, encuentra que con la arena de tamaño menor de ese rango que es la de .095 mm se tiene el menor tiempo de fusión de 39 min, en ese momento se tiene la mayor cantidad de burbuja en el vidrio , y se obtiene el menor tiempo para la eliminación de la burbuja de 122 min. Frolich(13) trabaja a 1300 °C, utiliza arena en un rango de tamaño de 0.075 mm a 0.4 mm, encuentra que con la arena de tamaño menor en ese rango propicia el menor tiempo de fusión de 35 min y utilizando arena de .200 mm se obtiene el menor tiempo de refinación. Cable y Frolich coinciden de manera aproximada en el tamaño de arena que propicia una fusión más rápida , pero difieren en el tamaño de arena que de una refinación mas rápida , mientras que Frolich encuentra un tamaño óptimo que minimiza la refinación, Cable encuentra la tendencia del efecto sin encontrar un mínimo dentro de sus rangos.

Los resultados de las referencias anteriores presentan algunas diferencias pero en general indican que el tamaño de grano de la arena sílica utilizada en la mezcla influyen en el proceso de fusión de vidrio, de tal manera que a menor tamaño de grano de arena se obtienen vidrios fundidos y refinados en menor tiempo . Las diferencias en los niveles de los efectos encontradas pueden ser por la variación

propia del experimento como; temperatura de fusión, tamaño de mezcla, tipo de horno, método de medición de la fusión, por la variación en las materias primas tanto en su calidad , cantidad. También puede ser por el tamaño de grano de los restantes componentes de la mezcla que en conjunción con el tamaño de la arena propicien un tiempo de fusión y refinación mínimo.

El trabajo de tesis presente no puede ser resuelto por los estudios de las referencias bibliográficas 12, 13, 15, 16, 17, y 18, ya que si bien abordan el tema , trabajan con vidrio calizo simple compuesto de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{CaO}$ , obtenido a partir de materias primas como arena sílica carbonato de sodio y carbonato de calcio, este vidrio difiere en formulación del vidrio industrial de la planta en que se quiere experimentar. De acuerdo con Noel(11) y Cable(27) la fórmula , como los componentes de la misma afectan la formación de burbuja en el vidrio. Así, el vidrio de VITROCRISA, aún siendo vidrio calizo incorpora a su fórmula además de los óxidos  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{CaO}$  otros tales como:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , y  $\text{SO}_3$ , que son suministrados por las materias primas, arena sílica, carbonato de sodio, calcita, dolomita, sulfato de sodio, feldespato y nitrato de sodio.

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En sí, estas referencias dan una guía sobre el efecto buscado y las variables involucradas en el proceso de fusión tales como la temperatura y el tiempo de fusión, y pueden soportar a la hipótesis planteada en este trabajo, principalmente por los resultados de Cable(15) y Frolich(13) que se pueden interpretar de la siguiente manera; entre más rápida se efectúe y termine la fusión, más temprano se producirán los gases que originan la burbuja y estos tendrán un mayor periodo de tiempo para abandonar el vidrio dentro de la refinación.

El proceso de homogeneización y de eliminación de los gases disueltos y de las burbujas ocluidas se conoce como afinación ó refinación(19). La afinación puede efectuarse mediante procedimientos químicos y procedimientos físicos(20). Los metodos químicos para remover las burbujas del vidrio fundido se basan en la adición a la mezcla de componentes llamados agentes afinantes, tales como: óxido de arsénico, óxido de antimonio, nitrato de sodio, nitrato de potasio, cloruro de sodio, sulfato de sodio(20,21). Los agentes afinantes liberan grandes cantidades de gases, los cuales forman burbujas grandes que tienden a subir a la superficie del vidrio fundido, acarreando en su trayectoria con las burbujas pequeñas. Aunado a lo anterior algunos agentes causan la absorción de O<sub>2</sub> de las burbujas hacia el vidrio, disminuyendo su tamaño hasta desaparecer.

El óxido de arsénico y el óxido de antimonio se encuentran entre los agentes afinantes químicos más eficientes y estudiados. La acción afinante de estos dos óxidos es el resultado de una serie de reacciones químicas que ocurren en diferentes etapas del proceso de fusión que se muestran a continuación(20).

Durante la fusión de la mezcla estos óxidos reaccionan con el nitrato de potasio liberando O<sub>2</sub>.



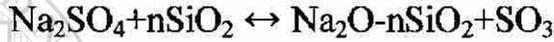
El NO y O<sub>2</sub> forman burbujas grandes que rápidamente emergen a la superficie acarreando burbujas pequeñas con ellas.

Después de la descomposición de la mezcla, el pentóxido reacciona a altas temperaturas liberando O<sub>2</sub> de acuerdo a lo siguiente:



Las reacciones son análogas para el óxido de antimonio. Esta reacción produce burbujas de  $\text{O}_2$ , las cuales pueden formar nuevas burbujas o difundirse en pequeñas burbujas presentes aumentando su tamaño y permitiendo su ascenso a la superficie.

Los sulfatos también son usados con frecuencia como agentes afinantes(20). En sus reacciones liberan gases que causan burbujas grandes que emergen rápidamente a la superficie.



El nitrato de sodio y el nitrato de potasio son usados como agentes afinantes, especialmente en combinación con el óxido de arsénico, su reacción de liberación de gas es la siguiente(21):



Los métodos físicos de remoción de burbujas del vidrio fundido los discute Pincus(22) quien propone los siguientes: decremento de la viscosidad del vidrio fundido, choque térmico, agitación mecánica, uso de presión reducida, uso de superficies rugosas, por desvitrificación, y por influencia de corrientes de vidrio. El proceso físico de afinación más importante es el primero, en donde la temperatura se incrementa hasta donde el proceso lo permite, provocando la liberación de los gases del vidrio fundido como resultado del decremento de su solubilidad, y al mismo

tiempo la facilidad de la ascensión de las burbujas hacia la superficie al disminuir la viscosidad del vidrio.

La etapa de afinación significa desventajas en el proceso productivo como altos consumos de energéticos, consumo de materiales afinantes, y menores tiempos de vida útil del horno por desgaste de refractarios por el efecto de altas temperaturas.

Un área de oportunidad de mejora en la producción de vidrio es encontrar parámetros operativos en el proceso que tengan influencia sobre la formación de la burbuja en el vidrio y poder atenuar los recursos que se destinan en la afinación .

En este trabajo de tesis se estudia el efecto que ejerce el factor materia prima en la presencia de burbuja en el vidrio, dirigido particularmente a la determinación cuantitativa del efecto del tamaño de grano de la misma. El objetivo de este trabajo es establecer que arena sílica, de tres que se consumen en VITRO, produce la menor cantidad de burbujas en el vidrio después de la fusión y refinación, caracterizándose por el tamaño de grano de cada una de ellas. El rango del tamaño de grano de estas arenas se encuentra en un intervalo de 0.09 mm a 0.5 mm.

La hipótesis propuesta en este trabajo es: el tamaño de grano de la arena sílica tiene influencia en la formación de burbujas en el vidrio calizo.

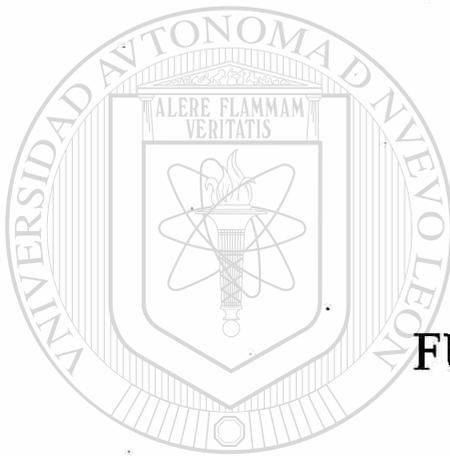
Esta hipótesis se propone en base al siguiente razonamiento: la primera acción en la formación del vidrio depende de la reacción química entre el carbonato de sodio y la sílica. La velocidad de cualquier reacción está determinada en un alto grado por el contacto íntimo entre los reactivos, es decir, que la fusión del vidrio depende de qué

tan eficiente sea el contacto físico entre los reactivos. El carbonato de sodio actúa sobre la superficie del grano de arena, por lo que esta acción depende de la cantidad de superficie de arena sílica expuesta al ataque del carbonato de sodio, así entre mayor área de superficie de la arena, se tendrá mayor velocidad de reacción. Entre más rápido se inicien y completen las reacciones químicas en la fusión, se tendrá una pronta evolución de burbujas que a su vez contarán con un periodo prolongado para su ascenso a la superficie del vidrio y desalojo del mismo. Sin embargo, una temprana disolución de la sílice causa un aumento súbito de la viscosidad del fundido, presentando a las burbujas formadas, dificultad para emerger del vidrio. Se sugiere en este estudio determinar que tamaño de grano de arena en el rango mencionado, propicia en tiempo y temperatura definidos, un menor número de burbujas .

A nivel industrial se trabaja con variantes de vidrios calizos definidos por el proceso de fabricación en el cual el vidrio se va a trabajar. El vidrio se adecúa en sus propiedades físicas mediante la composición del mismo, para que pueda ser transformado en las máquinas formadoras a su presentación final. En la planta se cuenta con producción de diferentes vidrios calizos, para este trabajo se estudió un vidrio calizo de punto de ablandamiento de 725°C, para producir vasos en máquinas de proceso prensa sople de alta velocidad, siendo esta formulación propiedad y desarrollo de la empresa.

El trabajo experimental desarrollado para la elaboración de la presente tesis tuvo como objetivo lo siguiente:

- a) Determinar cuantitativamente el efecto del tamaño de grano de la arena sílica en un rango de 0.09 a 0.5mm, en la formación de inclusiones gaseosas en la producción de vidrio calizo de punto de ablandamiento de 725°C.
- b) Determinar, de entre tres arenas con un tamaño de grano diferente y dentro del rango mencionado, cual produce el menor número de burbujas en la producción de vidrio calizo de punto de ablandamiento de 725°C.
- c) Determinar el efecto de la temperatura de fusión en un rango de 1400°C a 1450°C, sobre la formación de burbujas en el vidrio producido.
- d) Determinar el efecto que ejerce el tiempo de fusión en un rango de 3 a 6 horas, sobre la formación de burbujas en el vidrio producido.



**CAPÍTULO 2**  
**FUNDAMENTOS**

UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## FUNDAMENTOS

En este trabajo se determinó estudiar un vidrio que se produce en la planta de VITROCRISA en procesos de fabricación de vasos de mesa en máquinas tipo prensa sople de alta velocidad de producción de hasta 100 piezas por minuto. Este vidrio corresponde a una formulación del tipo calizo, que es aquel que se encuentra formado principalmente por óxido de silicio, óxido de sodio y óxido de calcio. La característica principal de este vidrio es el de tener un punto de ablandamiento alto, que le permite el fraguado rápido, condición necesaria en este proceso de fabricación.

La fabricación del vidrio en la planta se lleva a cabo mediante las siguientes etapas:

- 1.- Pesaje de materia prima
- 2.- Mezclado de materia prima
- 3.- Fusión
- 4.- Refinación
- 5.- Homogenización
- 6.- Acondicionamiento térmico
- 7.- Manufactura
- 8.- Recocido de artículo

En la conformación de la mezcla que da origen al vidrio, se suministran diferentes materias primas, cada una de las cuales tiene una función específica, que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2. Función de la materia prima en el vidrio

MATERIAL	APORTACIÓN AL VIDRIO	MATERIA PRIMA
Vitrificante	Formador de red	Arena sílica
Fundente	Modificador de red	Carbonato de sodio
Estabilizante	Estabilizador químico	Carbonato de calcio, dolomita, Óxido de aluminio
Decolorizante	Enmascara tono no deseable	Selenio, Óxido de cobalto, Óxido de arsénico, Nitrato de sodio
Afinantes	Eliminador de burbuja	Sulfato de sodio, carbón, Óxido de arsénico, Nitrato de sodio

En esta experimentación solo se introdujeron las materias primas formadoras, las materias primas estabilizadoras, y las materias primas fundentes. No se tomaron en cuenta las materias primas afinantes ya que lo que se requiere es obtener el efecto

del tamaño de grano de la arena sílica sobre la formación de burbujas, y al introducir estas materias primas a la formulación, eliminarían o disminuirían las burbujas que se formen en la fusión, afectando al efecto causado por las arenas. Por otro lado, también se optó por prescindir en la formulación de los materiales decolorantes ya que estos sirven para enmascarar el tono verde provocado por el óxido de fierro, contaminante de las materias primas , y el color del vidrio no es de interés en este estudio.

El total de materias primas, mezcladas de manera uniforme, en su correspondiente proporción de acuerdo a la formulación, recibe el nombre de mezcla vitrificable.

Desde el momento del cargado de la mezcla vitrificable al horno, se inician las primeras reacciones de descomposición y un intenso desprendimiento de gases. La aparición de las primeras fases líquidas, a unos 785°C, dificulta esta degasificación y obliga a los gases liberados a burbujear a través del fundido, buscando la salida a la atmósfera; parte de estos gases se disuelven y parte permanecen en forma de burbujas(23).

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Manring(24) en su estudio sobre la influencia del proceso de preparación de mezcla sobre la fusión y afinación de vidrio, simplifica dicho proceso en los siguientes pasos:

1.- Abajo de 870°C solo ocurre un ligero encogimiento de partículas, con una reacción sólido sólido de baja eficiencia.

2.- Aproximadamente a  $870^{\circ}\text{C}$ , justamente arriba del punto de fusión del carbonato de sodio, tiene lugar una reacción rápida y violenta, formándose el metasilicato de sodio y dióxido de carbono. El metasilicato de sodio constituye la primera fase líquida.

3.- Los granos de feldespato se disuelven en esta primera fase a temperaturas entre  $982$  y  $1032^{\circ}\text{C}$ .

4.- El carbonato de calcio se descompone en dióxido de carbono y óxido de calcio; este último se disuelve lentamente en la fase líquida, llegándose a observar granos hasta los  $1480^{\circ}\text{C}$ .

5.- Los granos de sílica residuales que no participaron en la reacción inicial con carbonato de sodio, a  $870^{\circ}\text{C}$ , se convierten en cristobalita, formando espuma y retardando la terminación de la fusión y el afinado.

---

Fernández(25) comenta; después de haber reaccionado los componentes de la mezcla entre sí y de haberse formado la fase fundida, quedan algunos granos de sílica sin fundir; el tiempo que tardan en disolverse en el vidrio es directamente proporcional al cuadrado de su radio. De acuerdo a lo anterior, es conveniente disminuir el tamaño de grano, sin embargo esto aceleraría su disolución y se produciría un aumento prematuro de viscosidad del fundido, sin dar tiempo a que se eliminen los gases, y dificultaría su afinado.

Shekler y Dinger(26) en sus estudios del efecto de la distribución del tamaño de partícula en la fusión del vidrio calizo, resumen sus resultados en lo siguiente:

1.- En el inicio de la etapa de las reacciones de la mezcla se forman compuestos intermedios binarios, ternarios y carbonatos complejos, cuya formación es controlada por la distribución del tamaño de partícula de los componentes de la mezcla original.

2.- La formación de burbujas se inicia a 820°C para una mezcla con arena fina, a 865°C para la mezcla con arena de tamaño medio, y todavía no se observa formación de burbujas en este rango de temperatura en la mezclas con arena gruesa.

3.- La evidencia indica que la mayor variación en la cinética y trayectoria de reacción puede ser atribuida a las variaciones en la distribución del tamaño de partícula de los componentes de la mezcla. Sus datos y resultados se muestran en las figuras 8 y 9.

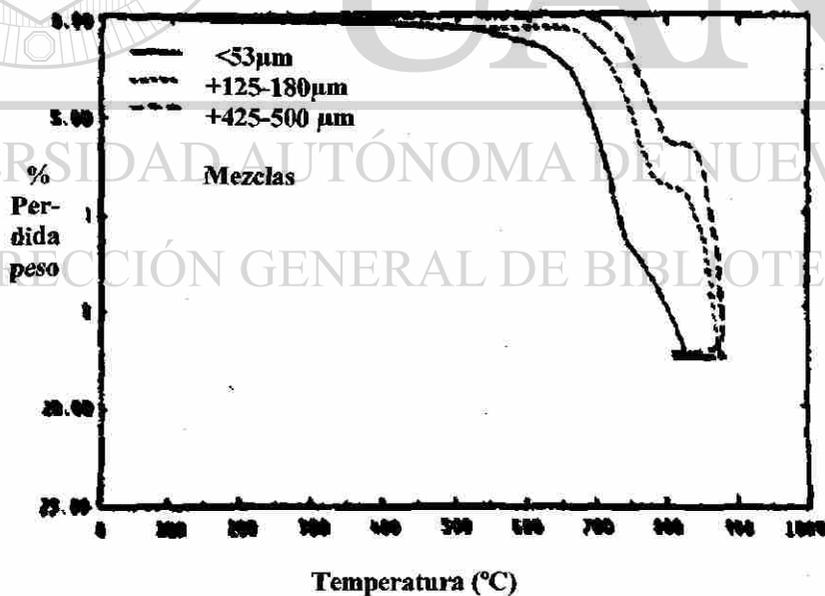


Figura 8. Análisis termogravimétrico de mezcla de vidrio calizo. Las tres mezclas tienen distribuciones de partícula <53, 125 a 180, y 425 a 500 μm.(26)

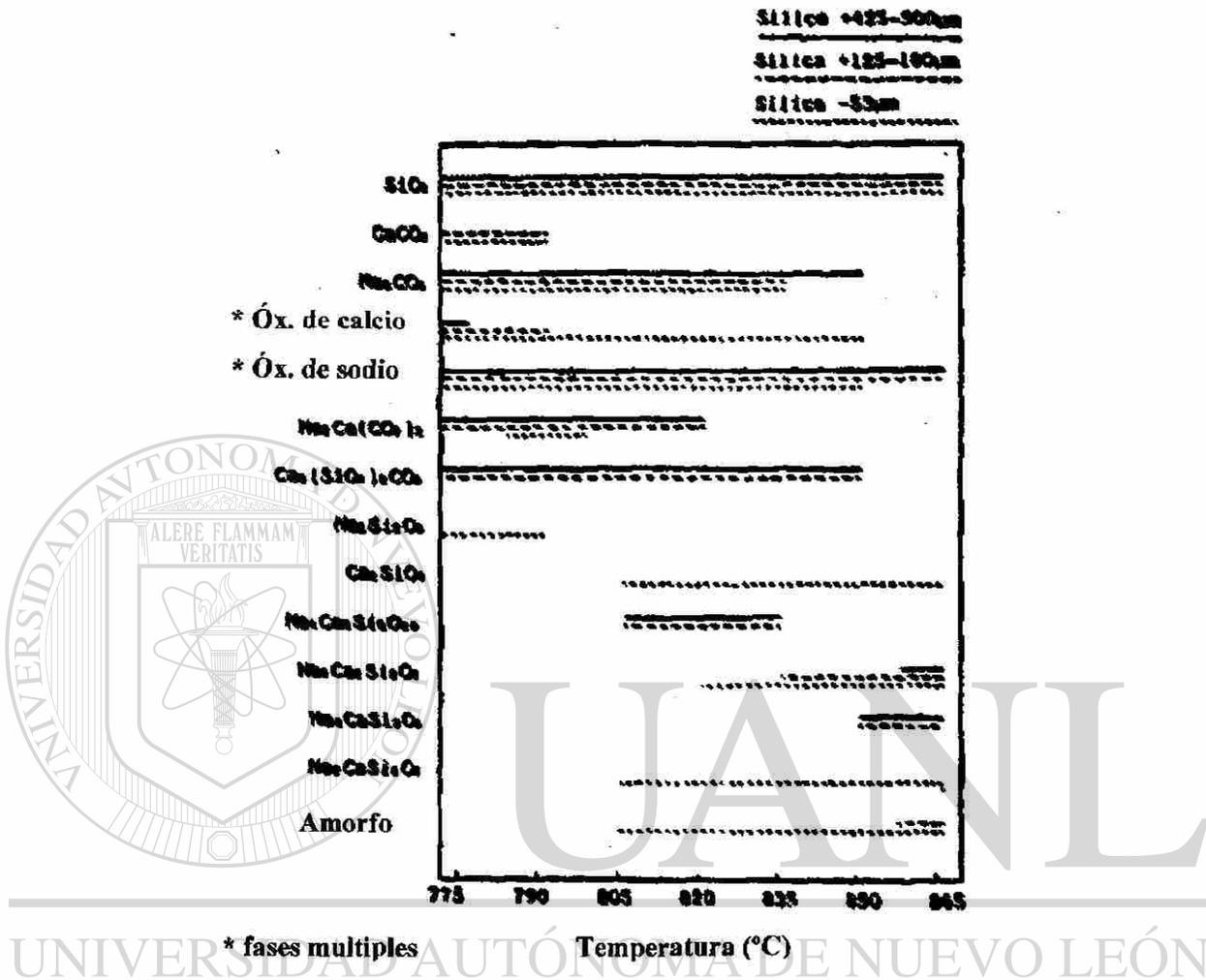


Figura 9. Comparación de las fases que fueron identificadas de mezclas con diferentes distribuciones de tamaño de partícula. El carbonato de sodio y la calcita son  $<53\mu\text{m}$ .(26)

Cable(27) señala que la experimentación en fusión de vidrio calizo ha demostrado que el tamaño de grano de la arena sílica tiene un mayor efecto en fusión que el tamaño de los demás materiales. La evidencia disponible es pobre, sin embargo, el mejor tamaño de grano probablemente dependerá de la composición del vidrio, de

los materiales de la mezcla, y las condiciones de la fusión. El tamaño óptimo de arena sílica encontrado, está en el rango de 0.1 a 0.25 mm.

Como se ha visto en las referencias citadas, la velocidad de la fusión de la mezcla aumentará a medida que el tamaño del grano de la arena disminuye; dado que es deseable que la fusión sea rápida, se recomendaría usar una arena sílica con el tamaño de grano mas pequeño posible; sin embargo, el vidrio comercial no requiere únicamente que el vidrio se encuentre completamente fundido, libre de material cristalino, sino requiere también que se encuentre refinado, libre de burbuja hasta una cantidad determinada. Por tanto el problema de esta tesis es determinar el tamaño de grano de arena sílica en un rango definido, que en combinación con los restantes componentes con su tamaño de grano fijo, produzcan un vidrio con la menor cantidad de burbuja.

Se determinó estudiar el efecto del tamaño de grano de la arena sílica ya que es el componente de mayor proporción en la mezcla vitrificable, porque es el único formador de vidrio de la misma, y porque se cita en las referencias 12, 13, 14, 15, 17 como el componente cuyo tamaño de grano influye en mayor importancia en la fusión de vidrio.

Para determinar el efecto que tiene el tamaño de grano de la arena sílica en la formación de burbujas en la fusión de vidrio calizo se determinó experimentar con arenas que cuentan con distribución de tamaño de grano diferente; un grano fino, uno medio, y uno grueso. Las restantes materias primas que conforman la mezcla vitrificable se tomaron tal como existen comercialmente y su granulometría fue fija en todos los experimentos. La definición de los tamaños de grano de arena a

experimentar fue en base a algunas de las arenas que actualmente se consumen en el grupo VITRO, y que tienen diferente tamaño de grano entre sí, los datos se muestran en la tabla 3.

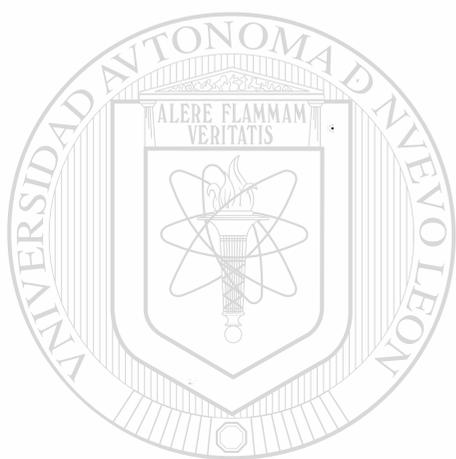
Tabla 3. Definición del tamaño de grano de la arena sílica como fino, medio, y grueso.

ARENA SÍLICA	CLASIFICACIÓN DE TAMAÑO DE GRANO	TAMAÑO PROMEDIO DE GRANO ( $\mu\text{m}$ )
OK 100	fino	109
Lampazos VC	medio	218
San José -40+50	grueso	362

Otra variable de gran importancia durante la fabricación del vidrio es la temperatura de fusión, ya que esta afecta a las reacciones químicas y la consiguiente evolución de gases; además modifica la viscosidad del vidrio obtenido y por lo tanto el movimiento ascendente hacia afuera del vidrio, de las burbujas formadas. Así pues se trabaja a dos diferentes temperaturas de fusión, una de 1400° C y otra de 1450° C. Se escogieron éstas temperaturas de experimentación ya que son los niveles normales de operación que se tienen en el horno en la etapa de fusión justo a nivel de carga y fundido.

Otra variable propuesta es el tiempo de fusión, es decir, el período que transcurre desde que se carga la mezcla de materias primas hasta que se vacía el vidrio, ya que la burbuja formada que permanece en el vidrio al término de las reacciones, sube a

la superficie en la medida que la viscosidad lo permite y obviamente en función del tiempo. Se define como tiempo de fusión a trabajar de 3 y 6 horas, dado que en la experiencia que se tiene sobre fusión de vidrio en crisoles se tiene estimado un tiempo máximo de fusión de 6 a 8 horas.



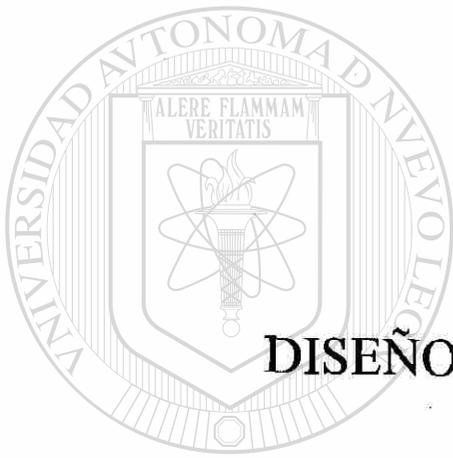
# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



**CAPÍTULO 3**  
**DISEÑO DE EXPERIMENTOS**

UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## DISEÑO DE EXPERIMENTOS

La experimentación se desarrolla en base a tres variables que son: tamaño de grano de arena sílica, temperatura de fusión, y tiempo de fusión. El tamaño de grano se estudia en tres niveles, y la temperatura y el tiempo de fusión se estudian con dos niveles.

Tabla 4. Variables y niveles de la experimentación

VARIABLE	NIVEL		
Tamaño de grano de arena sílica ( $\mu\text{m}$ )	109	218	362
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	1400		1450
Tiempo (h)	3		6

Para efectuar la experimentación se hicieron dos diseños que contemplan las variables antes mencionados con sus respectivos niveles. Estos seran dos diseños factoriales completos de tres variables de dos niveles , siendo un total de  $2^3 = 8$ , experimentos en cada uno.

Tabla 5. Diseño 1 de experimentos

DISEÑO 1

VARIABLE	NIVEL	
	BAJO (-)	ALTO (+)
Tamaño de grano ( $\mu\text{m}$ )	109	218
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	1400	1450
Tiempo (h)	3	6

Tabla 6. Experimentos del diseño 1

EXPERIMENTOS

EXP.	TAMAÑO DE GRANO ( $\mu\text{m}$ )	TEMPERATURA ( $^{\circ}\text{C}$ )	TIEMPO (h)
1	109	1400	3
2	218	1400	3
3	109	1450	3
4	218	1450	3
5	109	1400	6
6	218	1400	6
7	109	1450	6
8	218	1450	6

Tabla 7. Diseño 2 de experimentos .

DISEÑO 2

VARIABLE	NIVEL	
	BAJO (-)	ALTO (+)
Tamaño de grano ( $\mu\text{m}$ )	218	362
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	1400	1450
Tiempo (h)	3	6

Tabla 8. Experimentos del diseño 2.

EXPERIMENTOS

EXP.	TAMAÑO DE GRANO ( $\mu\text{m}$ )	TEMPERATURA ( $^{\circ}\text{C}$ )	TIEMPO (h)
1	218	1400	3
2	362	1400	3
3	218	1450	3
4	362	1450	3
5	218	1400	6
6	362	1400	6
7	218	1450	6
8	362	1450	6



## CAPÍTULO 4 EXPERIMENTACIÓN

UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## EXPERIMENTACIÓN

En resumen la experimentación consistió en realizar fusiones de mezcla de materia prima vitrificable conteniendo arenas de diferente tamaño de grano, variando la temperatura y el tiempo de fusión. Las fusiones se llevaron al cabo en un horno con combustión de gas aire, utilizando crisoles de refractario, y el vidrio obtenido se vacía en moldes metálicos y se les determina el número de burbujas presentes en el vidrio.

### 4.1 MATERIAS PRIMAS.

En el proceso de selección de las arenas a experimentar se propusieron tres diferentes tomando como base la distribución de grano conocida, material comercial, facilidad de adquisición, siendo estas :

Arena sílica OK100

Arena sílica Lampazos VC

Arena sílica San José

Se efectuó el análisis de mallas de estas arenas de acuerdo al “Standard Test Method for Sieve Analysis of Raw Materials for Glass Manufacture” ASTM C 429(28), catalogando según los resultados a la arena sílica OK100 como de grano fino, a la arena sílica Lampazos VC como de grano medio, y a la arena sílica San José en su fracción -40+50 como de grano grueso. Se criba y selecciona esta fracción

de la arena San José, ya que en su presentación total se encuentra con una gran dispersión en su distribución de grano, y de esta manera se eliminan los finos que se empalman con las otras dos arenas y también se elimina la porción de granos gruesos que se alejan de la fracción  $-40+50$ .

En las figura 10, 11, 12 se muestran la arena OK100, Lampazos VC, y San José  $-40+50$  respectivamente, en una vista microscópica de 32x.



Figura 10 Arena sílica OK100 a 32x



Figura 11 Arena sílica Lampazos VC a 32x



Figura 12 Arena San José -40+50 A 32X

La granulometría de cada una de ellas se muestran en las figuras 25, 26, Y 27 del apéndice 1.

También se determina la esfericidad del grano de las tres arenas, mediante un análisis de imagen, se encuentra que las tres arenas presentan esfericidad dentro de un rango estrecho, teniendo la arena OK100 un esfericidad de 0.864, la arena Lampazos 0.781 y la arena San José -40+50 una esfericidad de 0.729. Lo que indica que los granos de las tres arenas son similares en su forma. Los datos del análisis se presentan en la tabla 24.

Para los restantes materiales que conforman la mezcla de reacción se consideró elegir aquellos con los que se trabaja en la planta, mismos que se encuentran comercialmente disponibles , y cuya distribución granulométrica se mantuvo fija en todos los experimentos.

Las materias primas que se usaron para la formulación de la mezcla fueron las siguientes:

Arena Sílica OK 100

Arena Sílica Lampazos VC

Arena Sílica San José -40+50

Carbonato de Sodio

Carbonato de Calcio (Calcita)

Carbonato de Calcio y Magnesio(Dolomita)

Feldespatos San José 20

Las granulometrías se muestran en las tablas 28, 29, 30, 31 de los apéndices .

#### 4.2 FORMULACIÓN DE MEZCLA.

Para el establecimiento de la formulación de la mezcla vitrificable, se tomaron en cuenta los resultados de los análisis químicos típicos de los mismos, y en el caso de la arena sílica se tomó como base para el cálculo, el de la arena lampazos VC para obtener una mezcla con proporción fija , ya que cada una de las arenas propuestas para los experimentos tienen pequeñas diferencias en los resultados de sus respectivos análisis químicos, que darían lugar a ligeras desviaciones en peso en las mezclas obtenidas con cada una de ellas. Además, ya que el objeto de este estudio es determinar el efecto del tamaño de grano, la cantidad en la mezcla de cada arena a experimentar deberá ser la misma, para tener una misma base de comparación de los vidrios obtenidos en cada fusión. Realizando el balance de la mezcla con cada arena se obtienen composiciones de vidrios con ligeras diferencias en algunos óxidos, tales como el óxido de aluminio y el óxido de potasio que finalmente no tienen influencia significativa en la viscosidad que pudiera afectar el movimiento ascendente de las burbujas.

Un factor importante en el proceso de afinación es la viscosidad del vidrio. Esta se calcula teóricamente mediante la ecuación de Fulcher(6) utilizando los factores de Lakatos.

Se concluye: composición del vidrio a experimentar:

Tabla 9. óxidos de vidrio a experimentar.

ÓXIDO
SiO <sub>2</sub>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
CaO
MgO
Na <sub>2</sub> O
K <sub>2</sub> O
SO <sub>3</sub>
TiO <sub>2</sub>

Mezcla vitrificable:

Tabla 10. Materia prima de mezcla vitrificable.

MATERIAL
Arena Sílica
Carbonato de sodio
Carbonato de calcio
Carbonato de sodio y magnesio
Feldespatos

### 4.3 PREPARACIÓN DE MEZCLA

#### 4.3.1 PESAJE

Se pesó mediante una balanza granataria cada uno de los materiales de las diferentes mezclas de acuerdo a los resultados del diseño experimental.

Las mezclas resultantes para cada una de las arenas se presentan en la tabla 11

Tabla 11. Matriz de mezclas vitrificables con diferente arena sílica

MATERIA PRIMA	PARTICIPACIÓN		
Arena sílica San José -40+50	✓	---	---
Arena sílica Lampazos VC	---	✓	---
Arena sílica OK 100	---	---	✓
Carbonato de sodio	✓	✓	✓
Carbonato de calcio	✓	✓	✓
Carbonato de calcio y magnesio	✓	✓	✓
Feldespatos San José	✓	✓	✓

#### 4.3.2 HOMOGENEIZACIÓN DE MEZCLA

Una vez pesadas las materias primas se cargan a una revolvedora de laboratorio tipo trompo con listones y se someten a homogeneización durante un período de 5 minutos a razón de 15 rpm.

#### 4.4 FUSIÓN

La fusión de la mezcla para producir vidrio se efectúa en un horno de laboratorio de combustión gas natural y aire.

Este horno contiene una cámara de combustión de 3.9 pies cúbicos en donde se encuentra instalada un soporte refractario que sirve de porta crisoles. Se pueden colocar hasta seis crisoles por corrida.

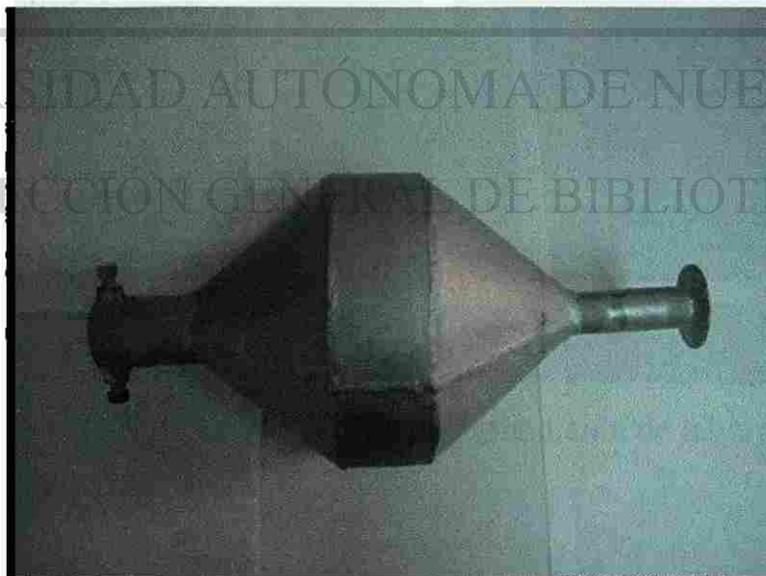


Figura 13. Revolvedora de laboratorio de mezcla

El equipo de combustión del horno es un premezclador de gas natural y aire tipo Maxon NORTHAMERICAN. En donde se derivan cuatro quemadores colocados tangencialmente en las paredes del horno.

El equipo de control de temperatura consta de un controlador marca HONEYWELL de lazo cerrado con algoritmo PID, y como elemento primario un termopar tipo R de rango 0 a 1770 °C . Además se contó con un pirómetro infrarrojo LAND para el monitoreo de la temperatura.

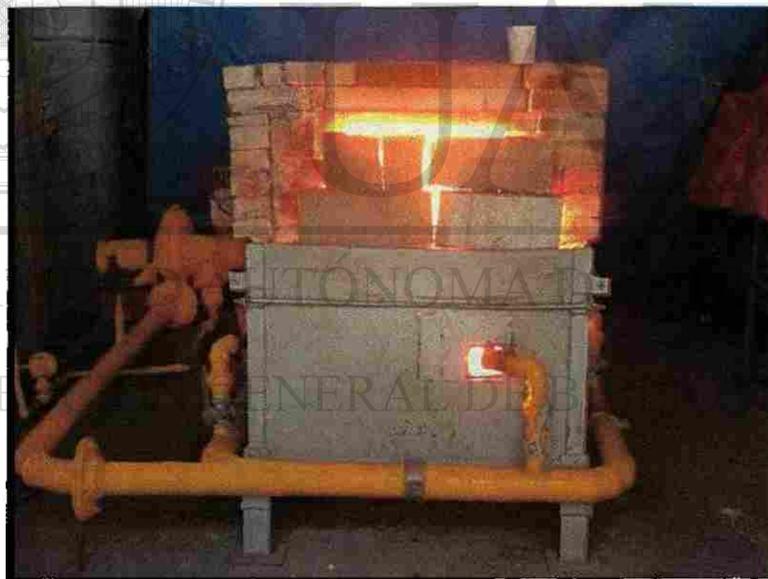


Figura 14. Vista frontal de horno de fundición de laboratorio



Figura 15 Sistema de control de temperatura de horno

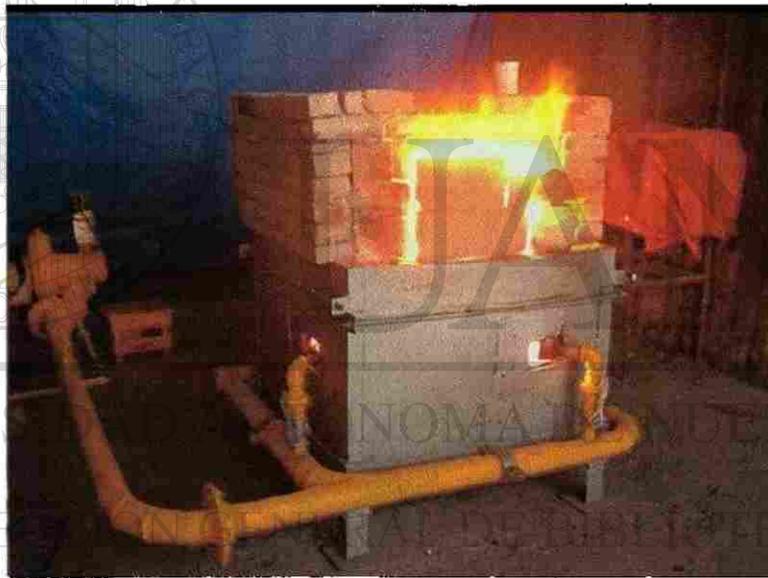


Figura 16. Sistema de combustión de horno

El procedimiento de fusión es el siguiente:

- 1.- Se colocan los crisoles dentro del horno sobre la placa de refractario porta crisoles, que contiene una capa de arena sílica para evitar que se peguen los mismos. Se cierra la puerta.

2.- Se enciende el horno, requiriéndose 12 horas para alcanzar y estabilizar el horno en la temperatura de trabajo.

3.- Se procede al cargado de los crisoles en donde se vacía la mezcla vitrificable en cuestión sobre un cucharón metálico con mango largo, que se introduce por la boca del horno, depositando su contenido sobre el crisol correspondiente.

4.- Se cierra la puerta del horno y se empieza a medir el tiempo.

5.- Se permite que la mezcla funda, dándole el tiempo y la temperatura definidos para el experimento.

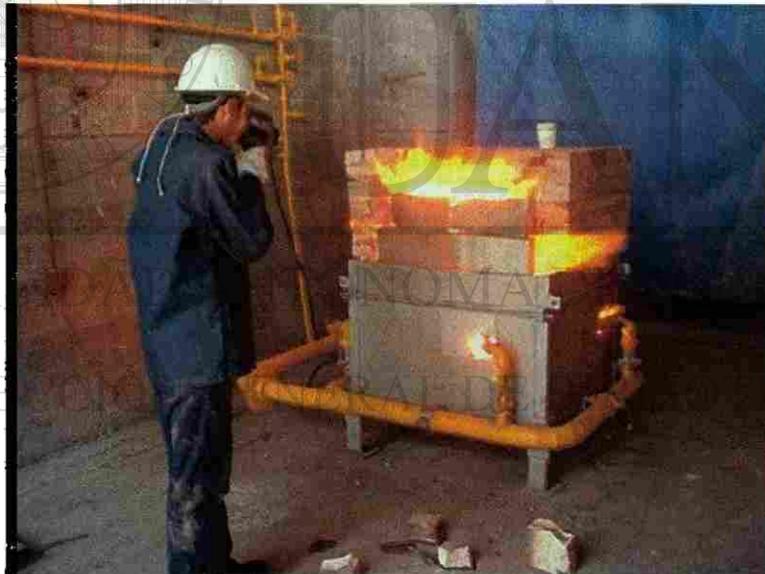


Figura 17. Medición de temperatura

6.- Una vez que se ha llegado al primer nivel de tiempo , que es de tres horas, se procede al vaciado del crisol correspondiente, en donde se abre la puerta del horno y con unas pinzas metálicas se retira el crisol y se vierte el vidrio fundido líquido sobre

moldes circulares de fierro vaciado. Al terminar se cierra la puerta y se continúa con la fusión de las mezclas vitrificables con un tiempo de seis horas, en donde al terminarse este, se vacían siguiendo el mismo procedimiento.

7.- Una vez que el vidrio de cada vaciada se fragua en el molde, se retira del mismo y se somete a un tratamiento térmico de relevación de esfuerzos.

8.- Las muestras de vidrio que así lo requieren son pulidas para retirar manchas de molde que pueden obstaculizar la visión en el conteo de burbuja.

9.- Se realiza el conteo del número de burbujas de los vidrios obtenidos y se refiere a unidad de masa de vidrio.

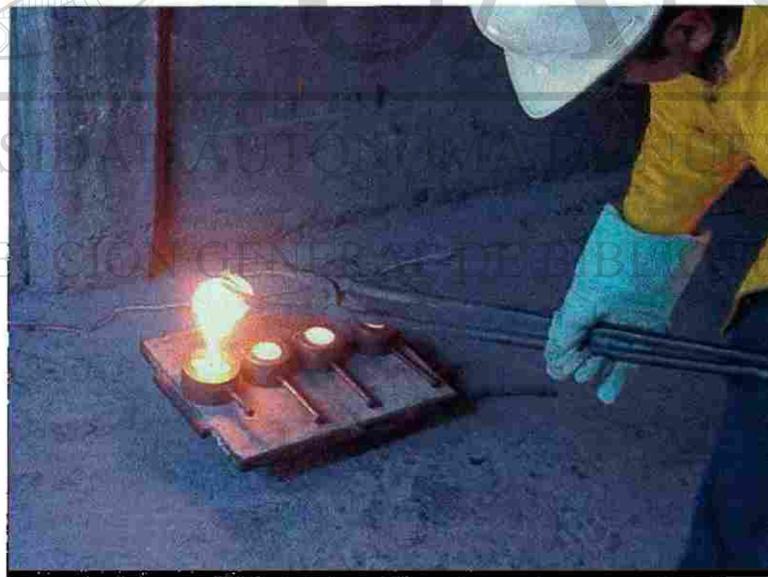


Figura 18. Proceso de vaciado de vidrio

#### 4.5 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE BURBUJAS

La determinación del número de burbujas se hace mediante un equipo utilizado en la determinación de colonias de bacterias llamado “contador de colonias”. Consta de una cámara de iluminación, un portamuestras con una cuadrícula guía, y un lente de aumento de observación en su parte superior .

El procedimiento de medición es el siguiente.

- 1.-Se coloca la muestra de vidrio a medir sobre el porta muestras.
- 2.- Se enciende la iluminación del aparato.



Figura 19. Contador de colonias

- 3.-Se observa la imagen a través del lente de aumento.

!020129169

4.- Se inicia el conteo del número de burbujas, relacionándolo con el peso de vidrio para obtener el número de burbujas presentes en el vidrio por unidad de masa.

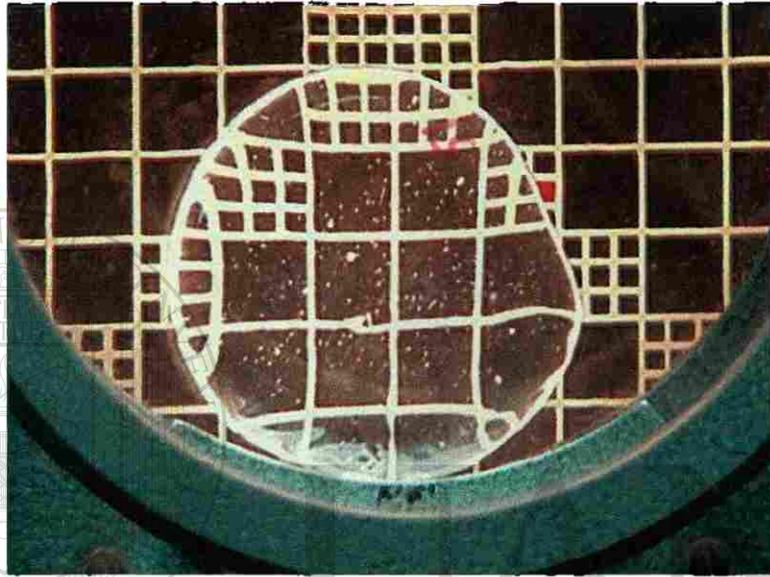
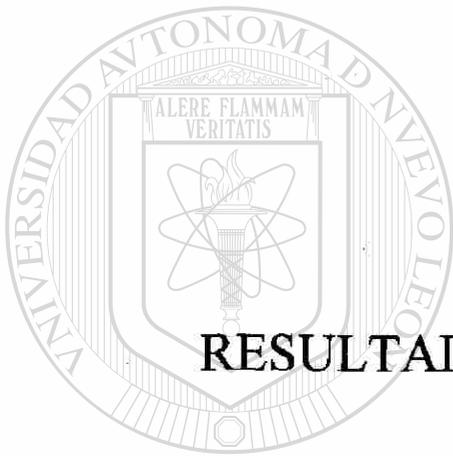


Figura 20. Muestra de vidrio montada sobre el contador

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## CAPÍTULO 5

# RESULTADOS EXPERIMENTALES

UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 5.1.- RESULTADOS

La medición de la burbuja obtenida en los vidrios resultantes de las fusiones se realizó mediante el contador de colonias cuyo procedimiento fue descrito con anterioridad. Se hicieron dos mediciones de burbuja para cada experimento y se obtuvo el promedio de ellas.

Se presenta los resultados del diseño 1 de experimentos en las tablas 13 y 14, en donde se agrupa las mezclas con arena Lampazos VC y la arena OK100. Los tres factores que se experimentaron en sus niveles bajo y alto se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 12. Factores y niveles del diseño de experimento 1

FACTOR	NIVEL	
	BAJO(-)	ALTO(+)
A: Tamaño promedio de grano de arena sílica ( $\mu\text{m}$ )	109 (s. OK 100)	218 (s. Lamp VC)
B: Temperatura de fusión ( $^{\circ}\text{C}$ )	1400	1450
C: Tiempo de fusión (Hr)	3	6

Tabla 13. Resultados del diseño de experimentos 1 (L: Lecturas)

RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN DEL  
DISEÑO 1

EXP	TAMAÑO DE ARENA ( $\mu\text{m}$ )	TEMP. ( $^{\circ}\text{C}$ )	TIEMPO (Hrs)	CORRIDA burb./oz			REPLICA burb./oz		
				L1	L2	M	L1	L2	M
1	218	1450	3	115.6	119.9	117.6	134.1	121.3	127.5
2	218	1450	6	27.21	28.06	27.5	29.7	30.6	30.0
3	218	1400	3	501.8	514.6	508	507.5	509.2	508.3
4	218	1400	6	149.1	151.4	150.2	122.4	124.1	123.3
5	109	1450	3	261.6	252.0	256.8	305.3	301.3	303.3
6	109	1450	6	69.4	72.5	70.88	74.28	73.14	73.7
7	109	1400	3	673	656.9	664.8	643.3	634.8	639
8	109	1400	6	154.8	158.2	156.5	159.3	154.8	157

Tabla 14. Matriz experimental 1 con los valores de respuesta

EXP.	A	B	C	RES 1	RES 2	R. MED.
1	-	-	-	664.8	639	651.9
2	-	-	+	156.5	157	156.7
3	-	+	-	256.8	303.3	280
4	-	+	+	70.8	73.7	72.2
5	+	-	-	508	508.3	508.1
6	+	-	+	150.2	123.3	136.7
7	+	+	-	117.7	127.5	122.5
8	+	+	+	27.5	30	28.7

Se presenta los resultados del diseño 2 de experimentos en las tablas 16 y 17, en donde se agrupa las mezclas con arena Lampazos VC y la arena San José -40 +50. Los tres factores que se experimentan en sus niveles bajo y alto se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 15. Factores y niveles del diseño de experimento 2

FACTOR	NIVEL	
	BAJO(-)	ALTO(+)
A: Tamaño de promedio de grano de arena sílica ( $\mu\text{m}$ )	218 (s. Lamp VC)	362 (San Jose -40+50)
B: Temperatura de fusión ( $^{\circ}\text{C}$ )	1400	1450
C: Tiempo de fusión (Hr)	3	6

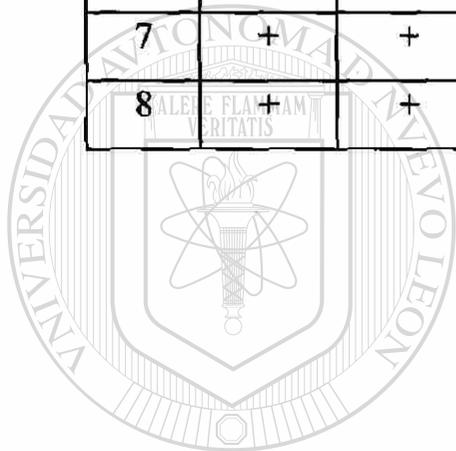
Tabla 16. Resultados del diseño de experimentos 2 (L: Lecturas)

RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN DEL  
DISEÑO 2

EXP	TAMAÑO DE ARENA ( $\mu\text{m}$ )	TEMP. ( $^{\circ}\text{C}$ )	TIEMPO (Hrs)	CORRIDA burb./oz			REPLICA burb./oz		
				L1	L2	M	L1	L2	M
1	362	1450	3	178.6	184.2	181.4	281.8	278.9	280.4
2	362	1450	6	80.5	80.2	80.2	111.9	112.2	110.5
3	362	1400	3	711.6	718.4	715	848.5	847.1	847.7
4	362	1400	6	201	206.1	203.5	197	196.4	196.7
5	218	1450	3	115.6	119.9	117.6	134.1	121.3	127.5
6	218	1450	6	27.2	28	27.5	29.7	30.6	30
7	218	1400	3	501.8	514.6	508	507.5	509.2	508.3
8	218	1400	6	149.1	151.4	150.2	122.4	124.1	123.3

Tabla 17. Matriz experimental 2 con los valores de respuesta

EXP.	A	B	C	RES 1	RES 2	R. MED.
1	-	-	-	508	508.3	508.15
2	-	-	+	150.2	123.3	136.7
3	-	+	-	117.6	127.5	122.5
4	-	+	+	27.5	30	28.7
5	+	-	-	715	847.7	781.3
6	+	-	+	203.5	196.7	200.1
7	+	+	-	181.4	280.4	230.9
8	+	+	+	80.2	110.5	95.3

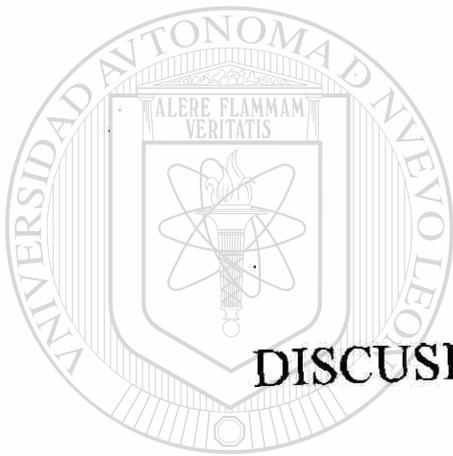


# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





**CAPÍTULO 6**  
**DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1.- DISCUSIÓN

Se presenta el análisis gráfico de los resultados del diseño de experimentos 1 en la figura 21, en donde se muestra el efecto de cada uno de los factores de la matriz de diseño 1 de la tabla 14, obtenido a partir del promedio de los resultados de su nivel bajo y de su nivel alto.

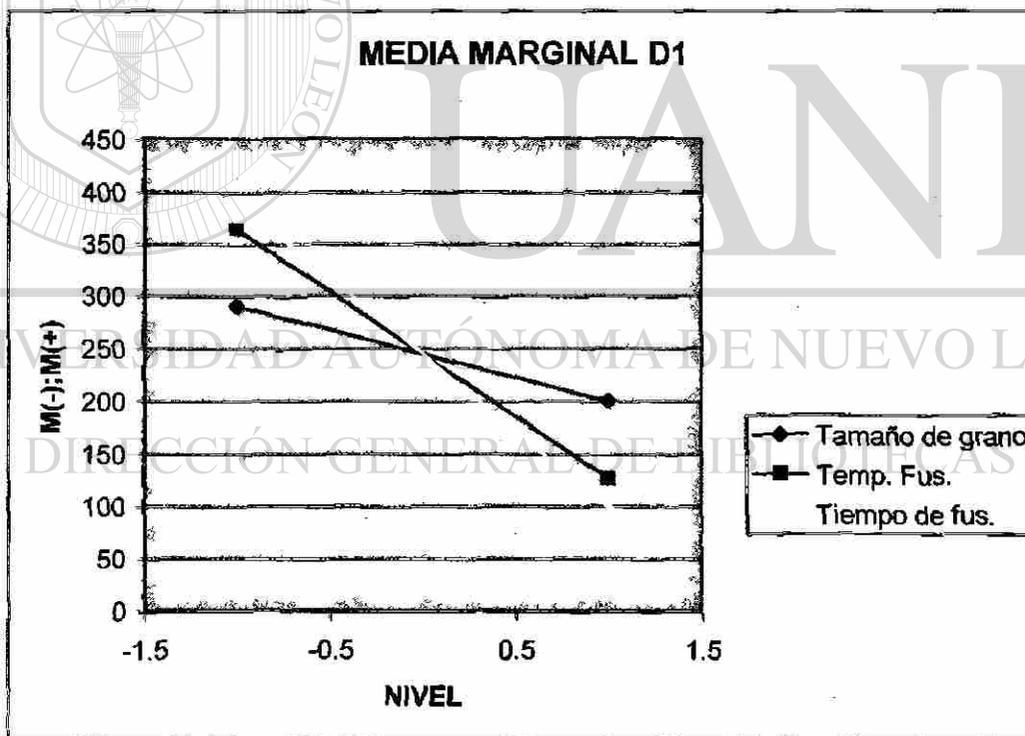


Figura 21. Gráfica de la respuesta promedio del nivel bajo (-) y nivel alto (+) para cada factor del diseño 1.

De la figura 21 se puede deducir que el nivel de la formación de la burbuja en el vidrio se ve afectada grandemente por la temperatura y tiempo de fusión, y en menor grado por la variación del tamaño de grano entre la arena Lampazos VC y la arena OK 100.

El análisis del experimento nos indica que una temperatura alta de 1450°C y un tiempo alto de 6 horas de fusión favorecen la disminución del nivel de burbuja. En las fusiones efectuadas se encuentra que utilizando la mezcla vitrificable conteniendo la arena Lampazos VC se presenta una menor cantidad de burbuja a una determinada temperatura y tiempo de fusión que la mezcla utilizando la arena OK100.

ANOVA del diseño experimental 1. Calculado mediante programa de diseño de experimento(29).

Aproximación del diseño experimental= 81.45%

Error por variación debida al azar = 0.26%

Error por ajuste del modelo = 18.28%

Ecuación final del diseño de experimentos 1, en factores codificados:

$$\# \text{ Burbuja} = 244.82 - 118.92*B - 145.84*C$$

B = Temperatura

C = Tiempo

La ecuación muestra que la burbuja es fuertemente dependiente de la temperatura y del tiempo de fusión, y también indica que no es significativo un cambio en la formación de burbuja al utilizar arena de 109  $\mu\text{m}$  o de 218  $\mu\text{m}$ , aun cuando la cantidad de burbuja producida al utilizar la arena de 218  $\mu\text{m}$  es menor que usando la arena de 109  $\mu\text{m}$ .

Se presenta el análisis gráfico de los resultados del diseño de experimentos 2 en la figura 22, en donde se muestra el efecto de cada uno de los factores de la matriz del diseño 2 de la tabla 16, obtenida a partir del promedio de los resultados de su nivel bajo y de su nivel alto.

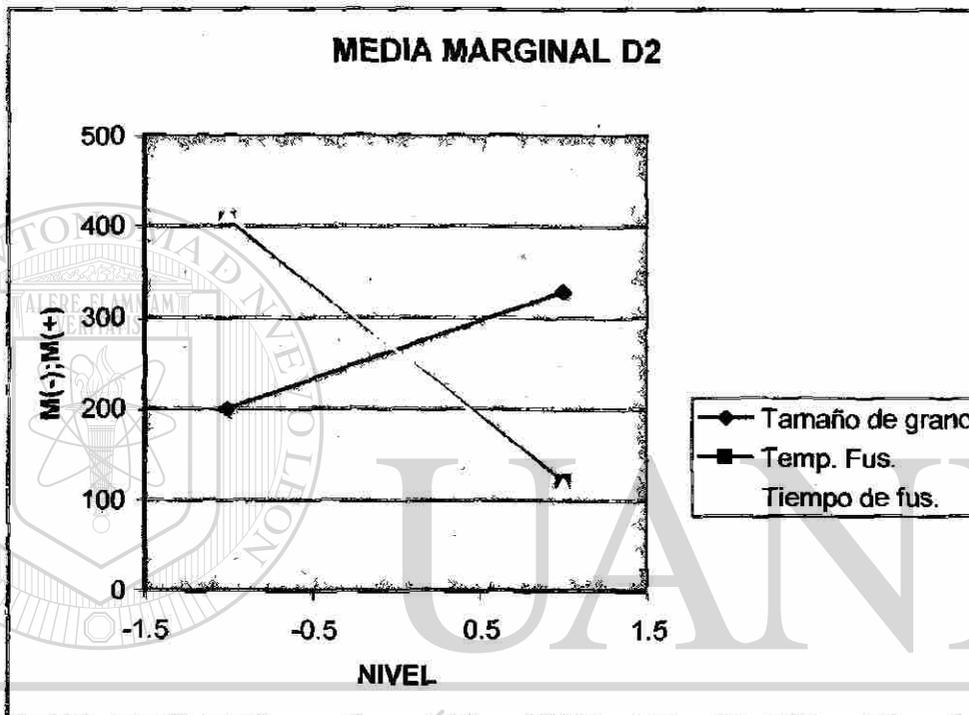


Figura 22. Gráfica de la respuesta promedio del nivel bajo (-) y nivel alto (+) para cada factor de diseño 2.

De la figura 22 se puede deducir que el nivel de la formación de la burbuja en el vidrio se ve afectada grandemente por la temperatura y tiempo de fusión, y además por la variación del tamaño de grano entre la arena Lampazos y la arena San José - 40+50.

El análisis del experimento nos indica que una temperatura alta de 1450°C, un tiempo alto de 6 horas de fusión y la utilización de la arena Lampazos favorecen a la disminución del nivel de burbuja.

ANOVA para el diseño experimental 2. Calculado mediante programa de diseño de experimentos(29).

Aproximación del diseño experimental = 98.41

Error por variación debida al azar = 1.58

Ecuación final en factores codificados:

$$\# \text{ Burbuja} = 262.99 - 63.94*A - 143.6*B - 147.75*C + 20.20*A*B + 31.45*A*C + 90.41*B*C - 21.01*A*B*C$$

A = Tamaño de grano

B = Temperatura

C = Tiempo

Como se observa en la ecuación, la burbuja depende de los tres factores manejados en el experimento. La ecuación muestra que la burbuja es fuertemente dependiente de la variación de temperatura y tiempo de fusión. Y en el caso del tamaño de grano de la arena, existe una variación de la formación de burbuja al cambiar de arena Lampazos a la arena San Jose -40+50.

Los resultados globales de la parte experimental se muestran en la tabla 18 y en las figuras 23 y 24. De igual manera se obtuvo la medición para la réplica. De tales resultados se deduce lo siguiente:

Tabla 18 Resultados experimentales de la corrida y su réplica.

RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN

ARENA	TEMP (°C)	TIEMPO (Hrs)	CORRIDA Burb/oz	REPLICA Burb/oz
SAN JOSÉ	1450	3	181.4	280.4
SAN JOSÉ	1450	6	80.2	110.5
SAN JOSÉ	1400	3	715	847.7
SAN JOSÉ	1400	6	203.5	196.7
LAMP. VC	1450	3	117.6	127.5
LAMP. VC	1450	6	27.5	30
LAMP. VC	1400	3	508	508.3
LAMP. VC	1400	6	150.2	123.3
OK 100	1450	3	256.8	303.3
OK 100	1450	6	70.8	73.7
OK 100	1400	3	664.8	639
OK 100	1400	6	156.5	157

1.- El grupo de fusiones que se efectuaron a 1400 °C presenta una mayor cantidad de burbuja para cada mezcla con su arena en su correspondiente tiempo de fusión, que el grupo de fusiones que se efectuaron a 1450 °C. Lo anterior se muestra en la figura 23 y 24 en donde con un aumento de 50°C la temperatura de fusión en el rango mencionado, y para un determinado tiempo de fusión la cantidad de burbuja disminuye entre un 52% hasta un 76% del contenido inicial de la misma como se muestra en la tabla 19, siendo la mezcla con arena lampazos VC la que presenta una disminución más grande de burbuja en esta condición.

2.- Para cada mezcla con su correspondiente arena al aumentar el tiempo de fusión de 3 horas a 6 horas se disminuye la cantidad de burbuja presente en el vidrio, a una determinada temperatura de fundición. Lo anterior se muestra en la tabla 20 en donde al aumentar el tiempo de fusión en 3 horas se tiene un decremento en la cantidad de burbuja a valores de 59% hasta 76% del contenido inicial de la misma, en las condiciones mencionadas.

3.- La mezcla con arena Lampazos VC presenta un nivel más bajo de burbuja que las otras mezclas a un determinado tiempo y temperatura de fusión. El punto de la experimentación que presenta menor cantidad de burbuja tiene las condiciones siguientes: temperatura de fusión de 1450°C , tiempo de fundición 6 horas, y mezcla vitrificable con arena lampazos VC.

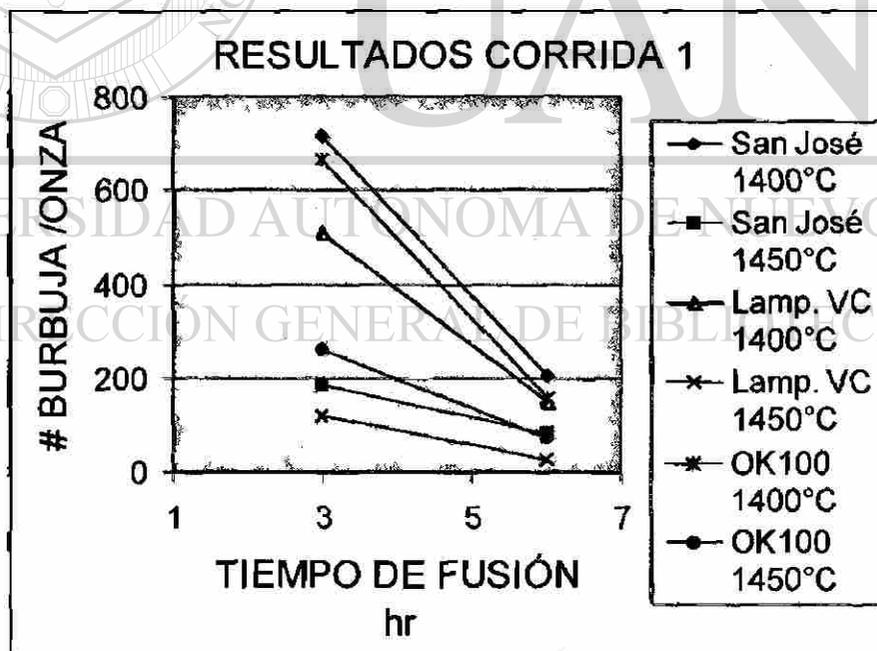


Figura 23. Gráfica de resultados experimentales de la corrida

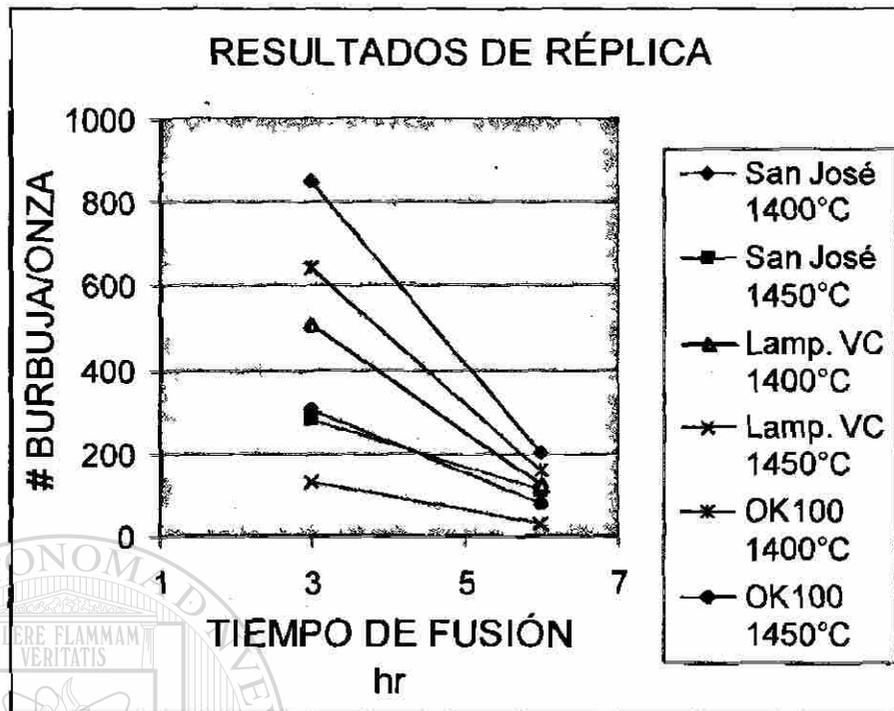


Figura 24. Gráfica de resultados experimentales de la réplica

Variación del número de burbuja con respecto a la temperatura de fusión.

Tabla 19. Disminución del número de burbuja al incrementar temperatura de fusión de 1400°C a 1450°C, para un determinado tiempo de fusión.

TIPO DE ARENA EN MEZCLA	TIEMPO. DE FUS. hr	% DE DISMINUCIÓN DE BURBUJA
Sílica San José -40+50	3	70.7
Sílica San José -40+50	6	52.3
Sílica Lamp VC	3	75.9
Sílica Lamp VC	6	79
Sílica OK100	3	57
Sílica OK100	6	54.3

Variación del número de burbuja con respecto a tiempo fusión.

Tabla 20. Disminución del número de burbuja al incrementar el tiempo de fusión de 3 a 6 horas, para una determinada temperatura de fusión.

TIPO DE ARENA EN MEZCLA	TEMP. DE FUS. °C	% DE DISMINUCIÓN DE BURBUJA
Sílica San José -40+50	1400	74.3
Sílica San José -40+50	1450	58.7
Sílica Lamp VC	1400	73
Sílica Lamp VC	1450	76.5
Sílica OK100	1400	75.9
Sílica OK100	1450	74.2

El resultado de este estudio indica que el tamaño de grano que produce menor cantidad de burbuja, dentro de los tres tamaños estudiados, es el de 109  $\mu\text{m}$  y el de 218  $\mu\text{m}$ . Este coincide con Frolich(13), quien encuentra que el menor tiempo para obtener un vidrio libre de burbujas se logra utilizando arena de tamaño de grano de 200  $\mu\text{m}$ .

El resultado es coincidente con Cable(15), quien deduce que a medida que el tamaño de grano de la arena decrece, la burbuja resultante al final de la completa disolución de la mezcla aumenta, sin embargo esta disminuye al final de la refinación.

También el resultado está de acuerdo con Potts(17), quien aun cuando su estudio lo dirige sobre la fusión sin tomar en consideración la refinación, encuentra que usando

arena con tamaño de grano de 300  $\mu\text{m}$  se tiene un mínimo tiempo para la fusión completa de la mezcla.

El resultado también es coincidente con el trabajo de Preston y Turner(18), quienes trabajaron sobre la fusión, y encontraron que esta se duplica al incrementarse la temperatura en 50 °C, en esta tesis se encuentra que al incrementarse la temperatura en 50 °C la burbuja al final de la fusión y refinación disminuye un 64 %. Preston y Turner(18) determinan que la velocidad de fusión es proporcional al área de superficie de los granos de arena sílica, es decir en cuanto menor sea el tamaño de los granos de arena mayor velocidad de fusión se obtendrá.

El resultado de la tesis lleva a concluir que la hipótesis planteada en este estudio es correcta, es decir, que el tamaño de grano de la arena sílica si tiene influencia en la formación de burbujas en el vidrio calizo.

La explicación científica del comportamiento de la burbuja en función del tamaño de grano de la arena sílica es sugerida de la siguiente manera ; la velocidad de la reacción del carbonato de sodio y la arena sílica está determinada en un alto grado por el contacto íntimo entre ellos. El carbonato de sodio actúa sobre la superficie del grano de arena, por lo que esta acción depende de la cantidad de superficie de grano de arena sílica expuesta al ataque del carbonato de sodio, por lo que a mayor área de superficie de arena o menor tamaño de grano, se tendrá mayor velocidad de reacción. Entre más temprano se inicien y completen las reacciones químicas en la fusión se tendrá una pronta evolución de burbujas, este último concepto es soportado por Shekler y Dinger(26) quienes demuestran que las reacciones en la fusión de vidrio son controladas por la distribución de partículas de los componentes de la mezcla, y

demuestran que la formación de burbujas empieza a menor temperatura, entre menor sea el tamaño de grano de la arena sílica. Así entre más pronto evolucionen los gases y se formen las burbujas, se contará con un periodo más prolongado para que estas emerjan del vidrio. Por otro lado una temprana disolución de la sílice causa un aumento de la viscosidad del fundido, oponiendo resistencia para la ascensión de las burbujas, por lo existe un equilibrio ente la rápida evolución de los gases y el aumento de la viscosidad del fundido, que propicia que la burbuja emerge y abandone el vidrio en un tiempo óptimo, y este quilibrio está dado por el tamaño de grano de la arena sílica usada en la mezcla vitrificable.

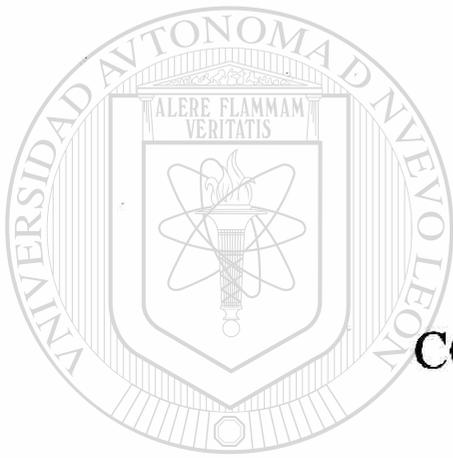


# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



**CAPÍTULO 7**  
**CONCLUSIONES**

UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## CONCLUSIONES

### 7.1 CONCLUSIONES

El nivel de la formación de burbuja en el vidrio se ve afectada grandemente por la temperatura de fusión, por el tiempo de fusión, y en menor proporción por el tamaño de grano de la arena sílica utilizada en la mezcla vitrificable, en la fusión de vidrio calizo.

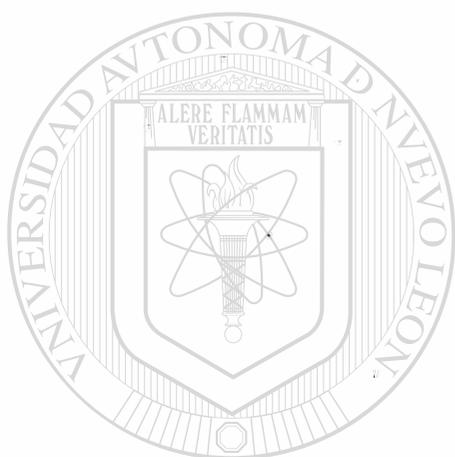
El tamaño de grano de arena sílica de 109  $\mu\text{m}$  y el de 218  $\mu\text{m}$  presenta comportamientos similares estadísticamente, y a su vez presentan menor producción de burbuja, que el tamaño de arena de 362  $\mu\text{m}$ .

El punto de la experimentación que presenta una menor cantidad de burbujas en el vidrio producido es utilizando; arena Lampazos VC, temperatura de fusión de 1450  $^{\circ}\text{C}$ , y un tiempo de 6 horas de fundición.

Aumentando la temperatura de fusión de 1400  $^{\circ}\text{C}$  a 1450  $^{\circ}\text{C}$ , se disminuye la cantidad de burbuja en el vidrio en un promedio de 64%, para los rangos de tiempo del experimento.

Aumentando el tiempo de fusión de 3 a 6 horas, se disminuye la cantidad de burbuja en el vidrio producido en un promedio de 72%, para los rangos de temperatura del experimento.

Los resultados obtenidos concuerdan con los estudios realizados en las referencias 12, 13, 15, 16, 17 y 18, en cuanto a el efecto de las variables tratadas. En lo que respecta al nivel de dichos efectos, no se podría comparar tal cual , por las condiciones diferentes de los experimentos y principalmente como ya se mencionó, por la diferencia que existe entre los vidrios y materias primas de estos estudios con el vidrio y materias primas del vidrio en estudio de esta tesis.

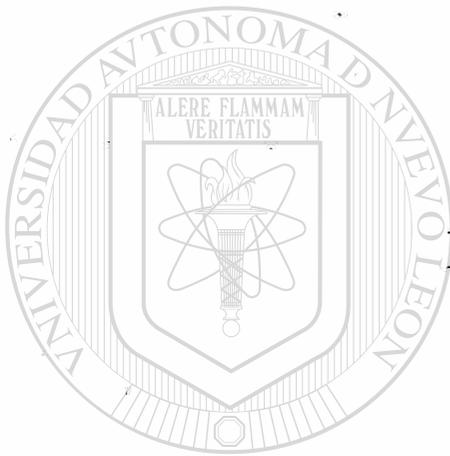


# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## REFERENCIAS

UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



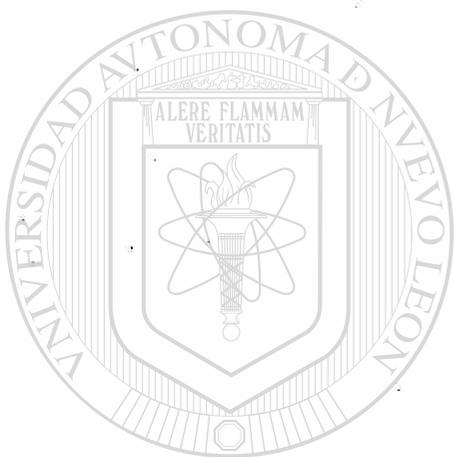
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.- Pankova , N. A ; Puz' V. V. Diagnosis of Causes at Bubble Formation in Glass Products. Glass and Ceramics V. 46 n 7-8 mar 1990 p.329 – 332.
- 2.- Doyle, P. J; “ Glass Making Today “.British Glass Industry Research Association,Sheffield,England 1979, p161.
- 3.- Tooley, F. V. “ Overview of the Glass Preparation Process “ The Melting Process in the Glass Industry by Pincus, CRDV 1980, P 1.
- 4.- Salmang, Herman. “Fundamentos Fisicoquímicos de la fabricación de vidrio” Ed. Aguilar. Madrid 1962, p 123-124.
- 5,7,10,19,23,25- Fernandez Navarro, J.M. “El vidrio “, Consejo Superior de Investigaciones Científicas I.C.V. Madrid 1985, p 155, 156; 175; 174; 172; 172; 171.
- 6.- VITROCRISA, “ FORGLASS V 3.0 , Sep1993.
- 8,20.- Shelby, James. Introduction to Glass Science and Technology. The Royal Society of Chemistry,1997. pag.25 – 47.
- 9.- Wouley, F. E. Melting / Fining. Engineered Materials Handbook. Vol.4 ; Ceramic and Glasses, Ed by S.J. Schneider, ASM Internacional1991, p.386 – 393.
- 11.- Noel, F. W. “The Eternal Problem of Seed “ The Melting Process in The Glass Industry by Pincus. CRDV P 81.
- 12.- Krak, J .B. “ Raw Materials of the Glass Industry “ Raw Materials in Glass Industry. By Pincus 1983, p4.

- 13.- Frolich, A. " the Particule Size of The Raw Materials and its Influence on the Course of Glass Fussions " . Acta Poly tech N.R. 51 Chemistry Including Metallurgy ; Vol 1 No. 14,1949 p 5-36.
- 14,24.- Manring W .H. Baver W. C. " Influence of Batch Preparation Process on the Melting and Fining of Glass Industry,Julio 1964, p.354 – 357.
- 15.- Cable, M. " An Investigation of the Effect of and Grain Size on the refining of a Pure Soda Lime Silica Glass in a Laboratory Furnace". Journal of The Society Glass Technology 1958 Vol.42 pag. 20-31.
- 16.- Marning, W. H. Baver W.C." Influence of Batch Preparation Process on the Melting and Fining of Glass : conclusion . The Glass Industry, julio 1964 p.413-416,449,450.
- 17.- Potts, J. C. Brookover G. and Burch O.G. " Melting Rate of Soda Lime Glasses as Influenced by Grain Sizes of Raw Materials and Additions of Cullet" Journal of the American Ceramic Society,Vol.27 No. 8 (1944).
- 18.- Preston,, E. Turner, W.E.S. " Fundamental Studies of The Glass Melting Process. The Effect of Particle Size and Temperature On the Rate of Glass Formation of a Pure Soda Lime Glass, Journal of the Society of Glass Technology; Vol. XXIV , 1940 p.124-138.
- 
- 21.- Shelby, James. " Bubbles and Fining of Melts. Glass Technology.Vol.9 No.4,1968. ®
- 22.- Pincus, A. " Committee of The German Society of Glass Technology. The Melting Process in The Glass Industry CRDV 1976, p100-110. DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
- 26.- Sheckler, Ch. Dinger, D. " Effect of Particle Size Distribution on The Melting of Soda Lime – Silica Glass. Journal of The American Ceramic Society 1990, Vol.73 No. 1 Pag.24-30.
- 27.- Cable, M. " Kinetics and Mechanisms of Fining Glasses Journal of the American Society; Vol. 49 No. 8, pag. 436-441.
- 28.- Standar Test method for Sieve Analisis of Raw Materials for Glass Manufacture ASTM C 429.

29.- DESIGN EASE SOFTWARE, VERSIÓN 5.0 "USRE GUIDE" STAT-EASE INC.



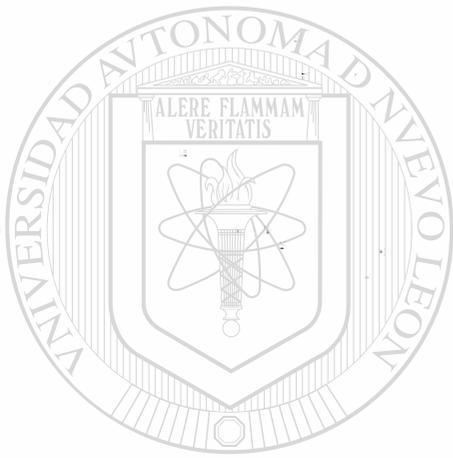
UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





## APÉNDICE 1

## TABLAS

UANL

---

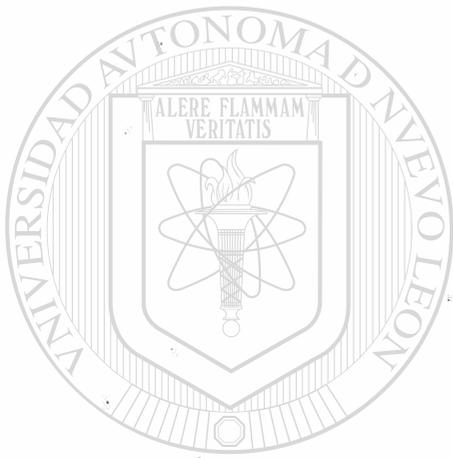
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Tabla 21 Análisis de esfericidad del grano de arena,  
mediante analizador de imagenes omnimet 1.4.

MUESTRA		ESFERICIDAD PROMEDIO
Sílica San José -40+50	1	0.718
Sílica San José -40+50	2	0.738
Sílica San José -40+50	3	0.749
Sílica San José -40+50	4	0.700
Sílica San José -40+50	5	0.742
PROMEDIO		0.729
Sílica Lampazos VC	1	0.794
Sílica Lampazos VC	2	0.760
Sílica Lampazos VC	3	0.776
Sílica Lampazos VC	4	0.777
Sílica Lampazos VC	5	0.798
PROMEDIO		0.781
Sílica OK100	1	0.869
Sílica OK100	2	0.859
Sílica OK100	3	0.838
Sílica OK100	4	0.859
Sílica OK100	5	0.877
PROMEDIO		0.860



**APÉNDICE 2**  
**FIGURAS**

UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTÉCAS

## GRANULOMETRÍA DE SÍLICA OK 100

# MALLA	%RETENIDO
10	0
14	0
20	0
30	0
40	0
50	0
70	0.2
100	0.6
140	49.8
200	47.5
<200	1.9

# MALLA	% ACUMULADO
10	0
14	0
20	0
30	0
40	0
50	0
70	0.2
100	0.8
140	50.6
200	98.1
<200	100

TAMAÑO µm	%RETENIDO
>2000	0
1700	0
1125	0
725	0
512	0
362	0
256	0.2
181	0.6
128	49.8
90	47.5
<75	1.9

Tamaño promedio de grano 109 µm

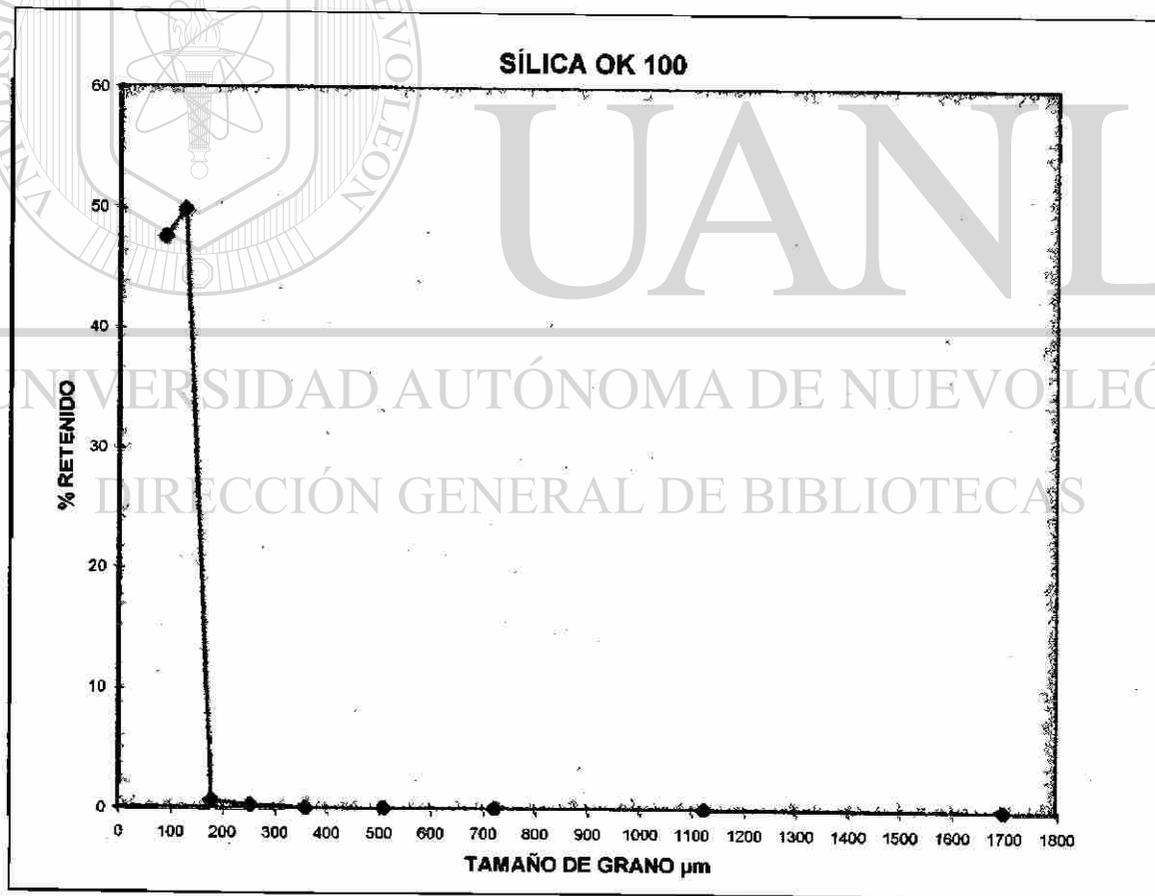


Figura 25. Granulometría de arena sílica OK100

## GRANULOMETRÍA DE ARENA SÍLICA LAMP. VC

# MALLA	%RETENIDO
10	0
14	0
20	0
30	0.1
40	0.4
50	4.5
70	43
100	44.1
140	6.6
200	0.8
<200	0.5

# MALLA	% ACUMULADO
10	0
14	0
20	0
30	0.1
40	0.5
50	5
70	48
100	92.1
140	98.7
200	99.5
<200	100

TAMAÑO μm	%RETENIDO
>2000	0
1700	0
1125	0
725	0.1
512	0.4
362	4.5
256	43
181	44.1
128	6.6
90	0.8
<75	0.5

Tamaño promedio de grano 218 μm

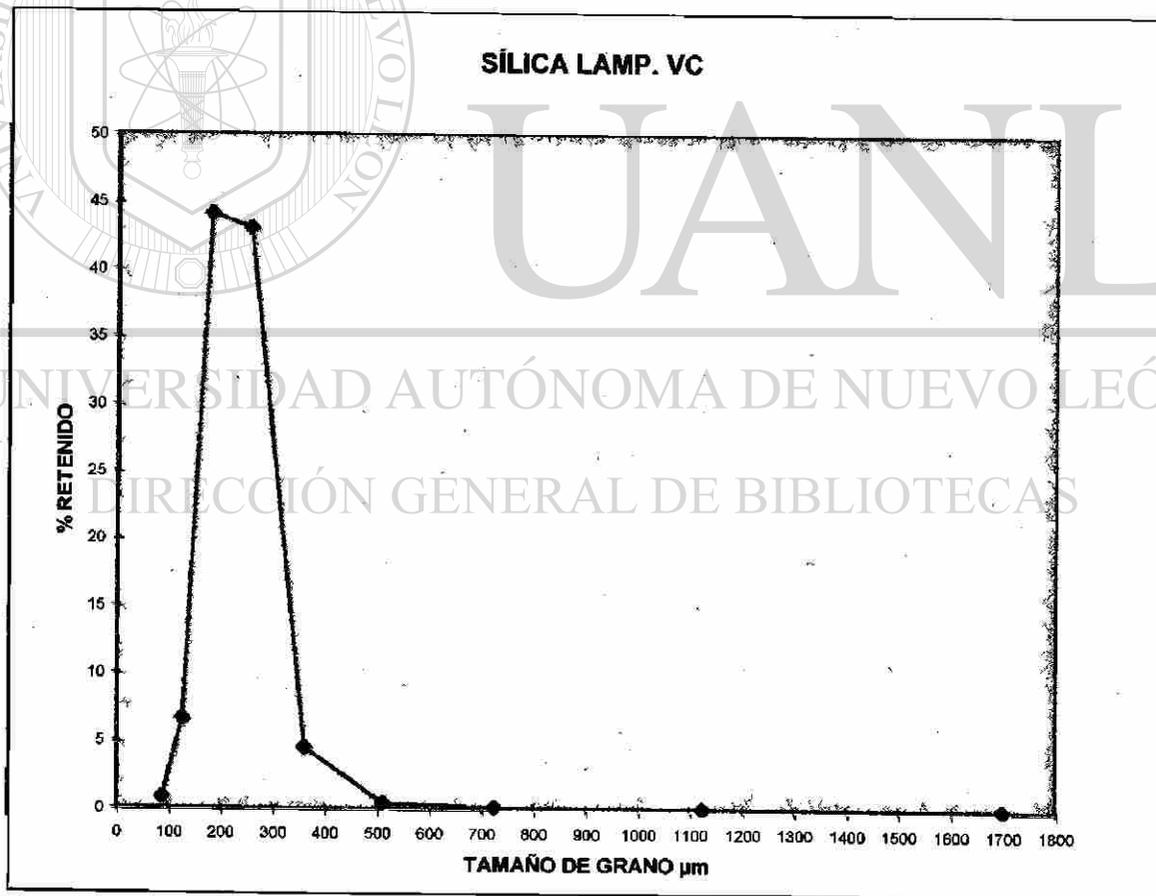


Figura 26. Granulometría de arena sílica lampazoa VC

## GRANULOMETRÍA DE SÍLICA SAN JOSÉ -40+50

# MALLA	%RETENIDO
10	0
14	0
20	0
30	0
40	0
50	100
70	0
100	0
140	0
200	0
<200	0

# MALLA	% ACUMULADO
10	0
14	0
20	0
30	0
40	0
50	100
70	100
100	100
140	100
200	100
<200	100

TAMAÑO	
µm	%RETENIDO
>2000	0
1700	0
1125	0
725	0
512	0
362	100
256	0
181	0
128	0
90	0
<75	0

Tamaño promedio de grano 362 µm

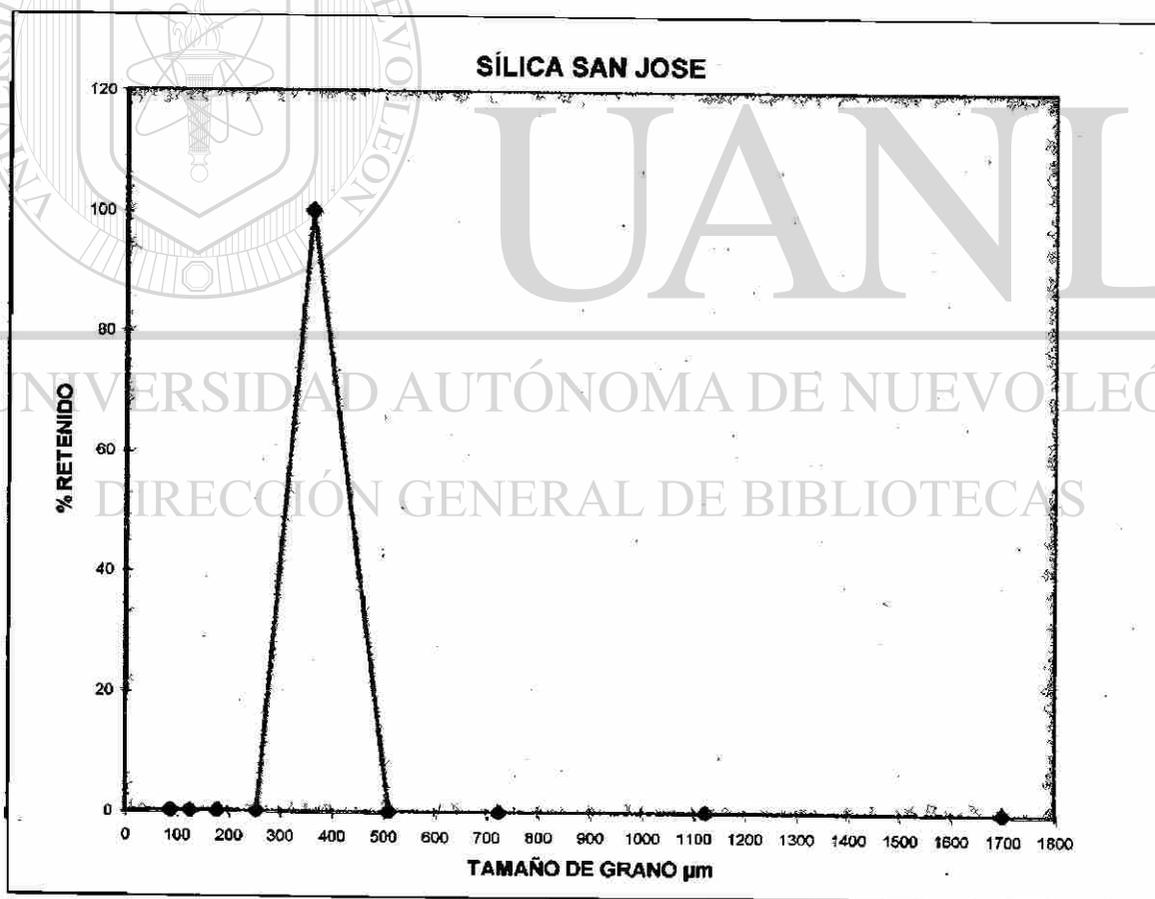


Figura 27. Granulometría de arena San José -40+50

## GRANULOMETRÍA DE SÍLICA SAN JOSÉ -40+50

# MALLA	%RETENIDO
10	0
14	0
20	0
30	0
40	0
50	100
70	0
100	0
140	0
200	0
<200	0

# MALLA	% ACUMULADO
10	0
14	0
20	0
30	0
40	0
50	100
70	100
100	100
140	100
200	100
<200	100

TAMAÑO	
µm	%RETENIDO
>2000	0
1700	0
1125	0
725	0
512	0
362	100
256	0
181	0
128	0
90	0
<75	0

Tamaño promedio de grano 362 µm

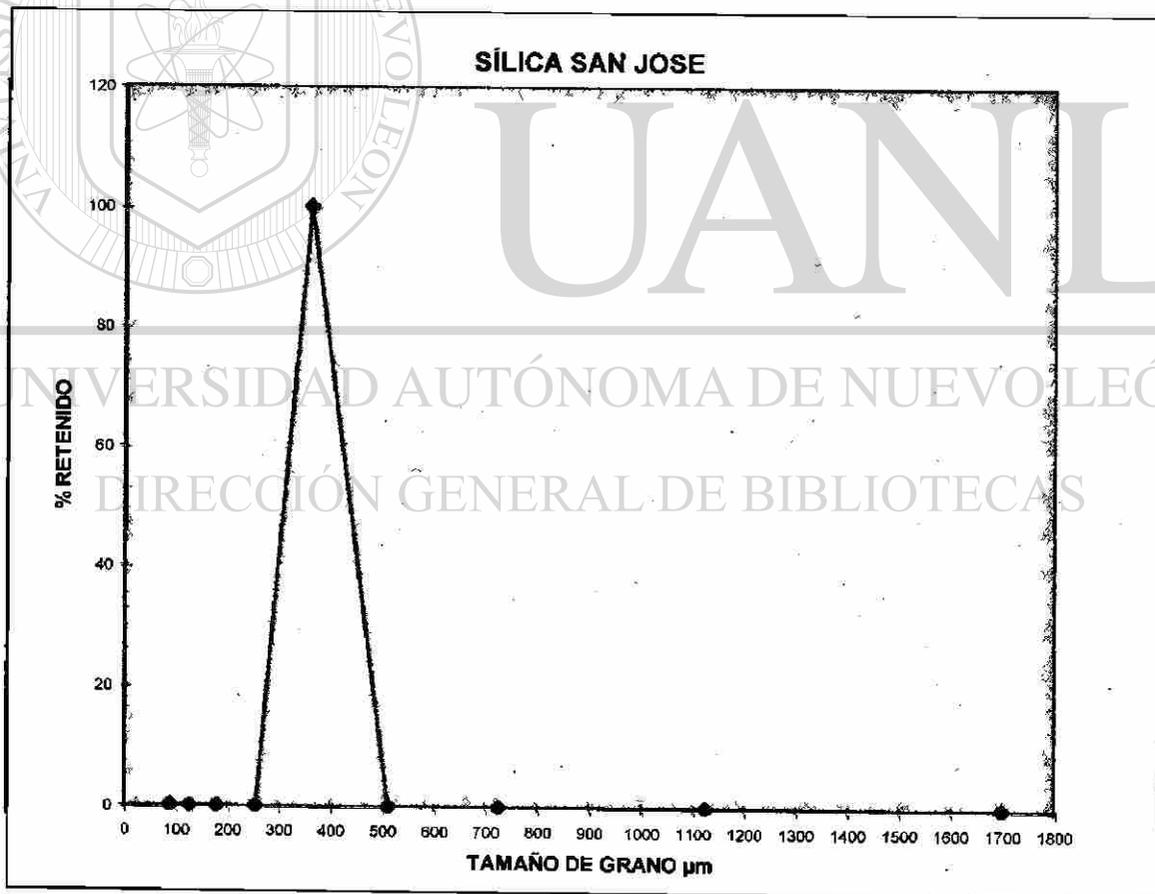


Figura 27. Granulometría de arena San José -40+50

## GRANULOMETRÍA DE FELDESPATO SJ

# MALLA	%RETENIDO
10	0
14	0
20	0
30	0.9
40	12.1
50	25.5
70	26.2
100	20.9
140	10
200	3.3
<200	0.9

# MALLA	% ACUMULADO
10	0
14	0
20	0
30	0.9
40	13
50	38.5
70	64.7
100	85.6
140	95.6
200	98.9
<200	99.8

TAMAÑO	
µm	%RETENIDO
>2000	0
1700	0
1125	0
725	0.9
512	12.1
362	25.5
256	26.2
181	20.9
128	10
90	3.3
<75	0.9

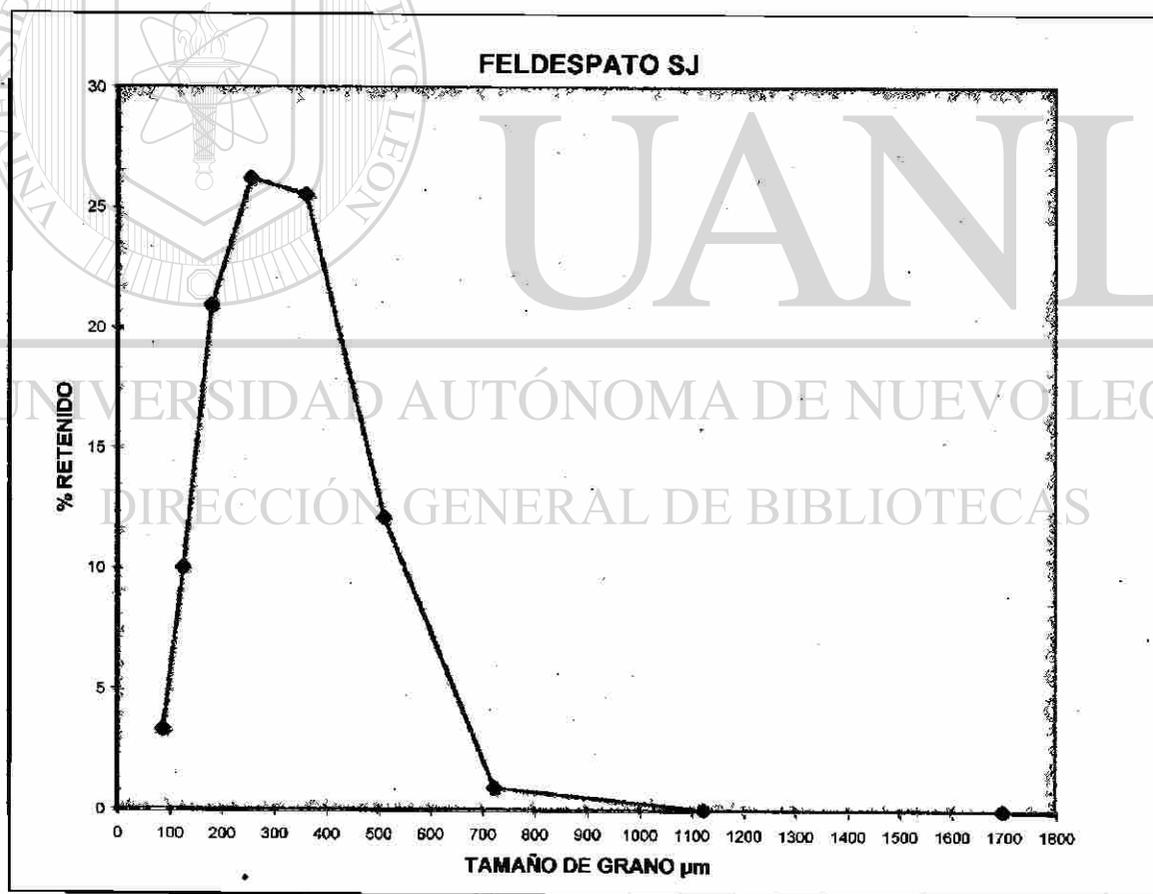


Figura 28. Granulometría de feldespato sj

## GRANULOMETRÍA DE DOLOMITA

# MALLA	%RETENIDO
10	0.1
14	4.5
20	14.1
30	12.2
40	11.2
50	10.2
70	8.9
100	8.1
140	5.7
200	7.5
<200	17.1

# MALLA	% ACUMULADO
10	0.1
14	4.6
20	18.7
30	30.9
40	42.1
50	52.3
70	61.2
100	69.3
140	75
200	82.5
<200	99.6

TAMAÑO	
µm	%RETENIDO
>2000	0.1
1700	4.5
1125	14.1
725	12.2
512	11.2
362	10.2
256	8.9
181	8.1
128	5.7
90	7.5
<75	17.1

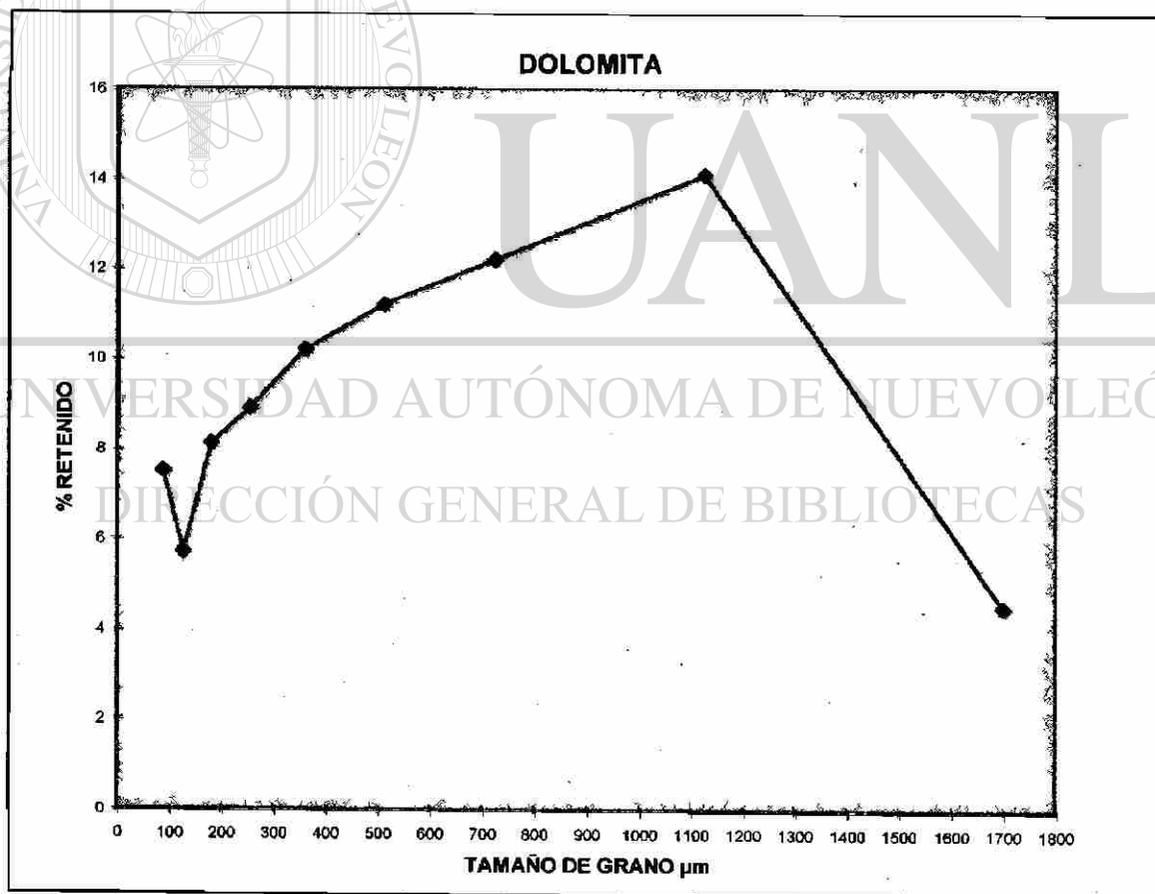


Figura 29. Granulometría de dolomita

## GRANULOMETRÍA DE CARBONATO DE SODIO

# MALLA	%RETENIDO
10	0
14	0.1
20	0.4
30	1.4
40	13.3
50	35.7
70	29.1
100	12.8
140	4.2
200	1.8
<200	0.8

# MALLA	% ACUMULADO
10	0
14	0.1
20	0.5
30	1.9
40	15.2
50	50.9
70	80
100	92.8
140	97
200	98.8
<200	99.6

TAMAÑO	
μm	%RETENIDO
>2000	0
1700	0.1
1125	0.4
725	1.4
512	13.3
362	35.7
256	29.1
181	12.8
128	4.2
90	1.8
<75	0.8

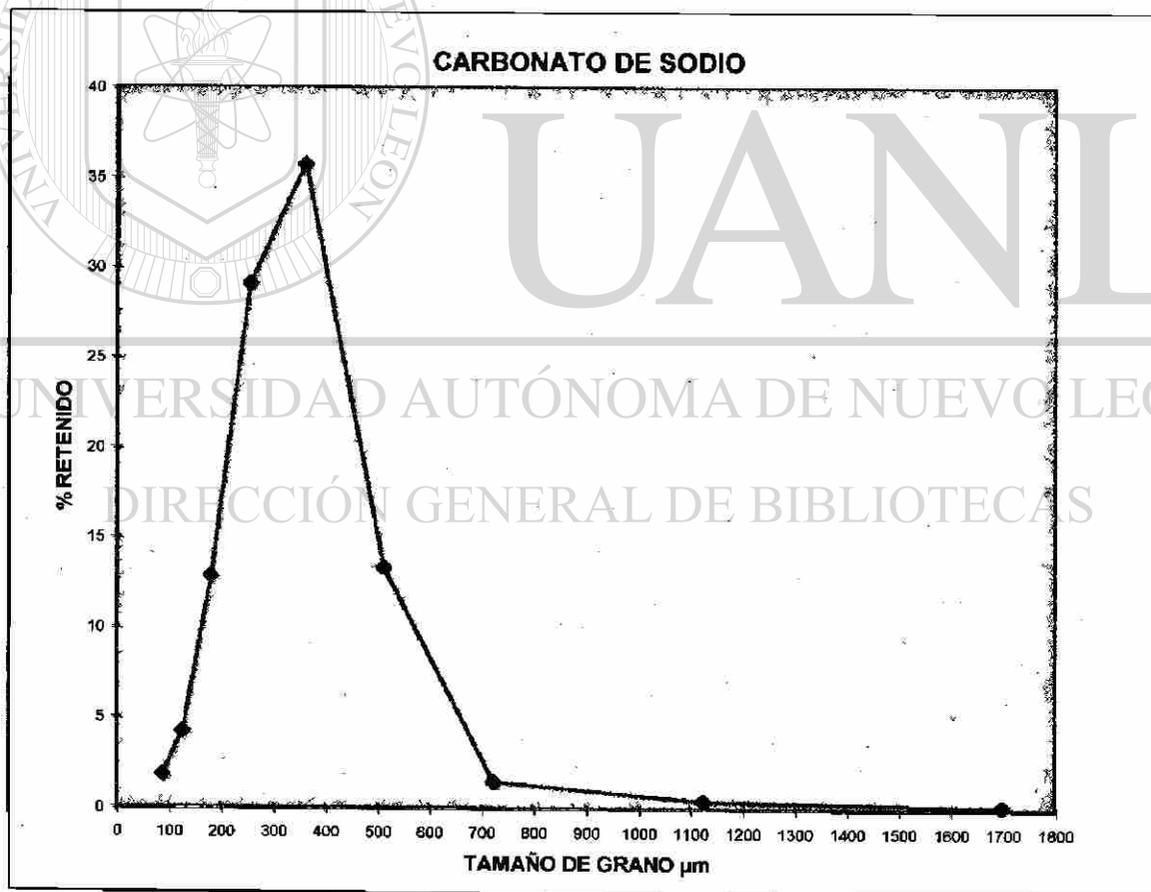


Figura 30. Granulometría de carbonato de sodio

## GRANULOMETRÍA DE CALCITA

# MALLA	%RETENIDO
10	0.1
14	9.8
20	26.82
30	13.4
40	10.8
50	9.3
70	7.1
100	5.7
140	3.7
200	3.7
<200	9.5

# MALLA	% ACUMULADO
10	0.1
14	9.9
20	36.7
30	50.1
40	60.9
50	70.2
70	77.3
100	83
140	86.7
200	90.4
<200	99.9

TAMAÑO µm	%RETENIDO
>2000	0.1
1700	9.8
1125	26.8
725	13.4
512	10.8
362	9.3
256	7.1
181	5.7
128	3.7
90	3.7
<75	9.5

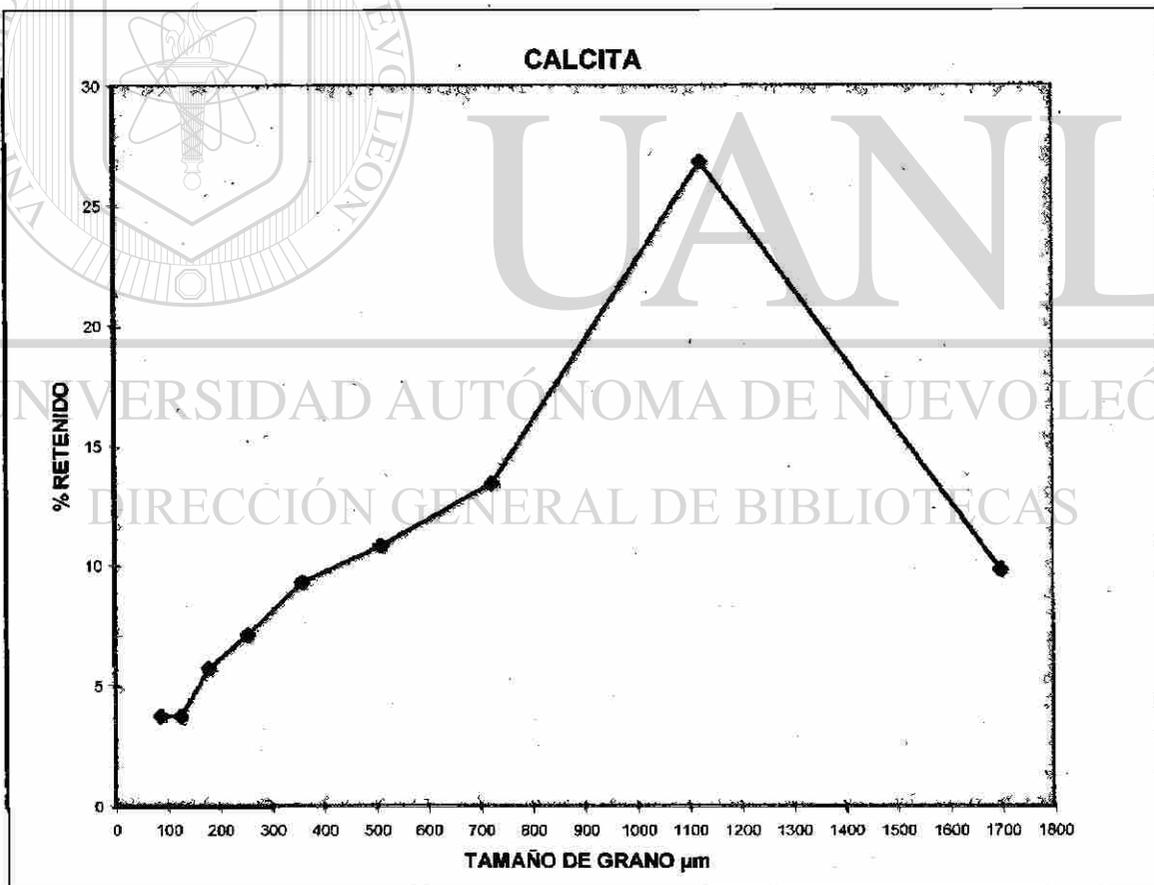


Figura 31. Granulometría de calcita

