5. Materiales y Métodos.

En esta sección se describirán los materiales, así como los métodos que fueron utilizados durante la realización de este trabajo de investigación. Cabe mencionar que el proyecto se divide en tres etapas, la primera es la parte experimental en donde se determina la factibilidad técnica; la segunda es el dimensionamiento y/o diseño de los equipos requeridos para el proceso artesanal propuesto y la tercera etapa es el análisis económico de la instalación de un taller para fabricar piezas cerámicas usando como materia prima residuos industriales.

Primero se explica la metodología para la parte experimental, en la figura 5-1 se muestra el diagrama de flujo de esta etapa y posteriormente se detallará cada parte de dicho diagrama.

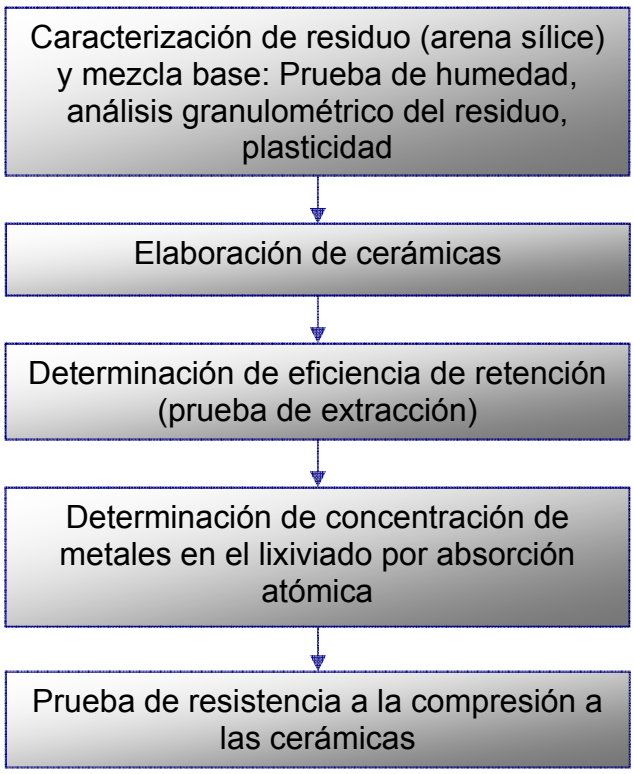

Figura 5-1. Diagrama de flujo de la parte experimental.

5.1 Caracterización del residuo y de la mezcla base.

5.1.1 Prueba de humedad.

La prueba para determinar la humedad, que se define como la cantidad de agua de una muestra, se basa en el método explicado en la norma NMX-AA-016.

5.1.1.1 Materiales.

El procedimiento para determina la humedad requiere el uso de los siguientes materiales:

- Crisol.
- Balanza analítica con sensibilidad de 0.001 g.
- Espátula para balanza.
- Estufa con temperatura de 150°C capaz de mantener una temperatura constante.
- Guantes de asbesto.
- Desecador con deshidratante.
- Pinzas para crisol.

5.1.1.2 Procedimiento.

Las etapas de esta prueba de laboratorio se describen a continuación.

a) Se coloca el crisol en la estufa a 393 K (120°C) durante dos horas, después se pasa al desecador durante una hora.
b) Pesar el crisol en la balanza, tomando la precaución de que en el lapso en el cual se saca el crisol del desecador y se pesa, dicho crisol tenga el mínimo

contacto con el ambiente para evitar que éste absorba humedad de la atmósfera.

c) Repetir el paso a) y b) hasta poner en peso constante el crisol, es decir, la diferencia de un peso y otro no debe ser mayor a 0.005 g. El último peso se considera como P1.
d) Pesar 10 g de la muestra y colocarlos en el crisol que está a peso constante.
e) Colocar el crisol con la muestra en la estufa a una temperatura de 100 ± 5°C durante dos horas.
f) Sacar el crisol más la muestra en la estufa y colocarlo en el desecador durante una hora.
g) Pesar el crisol con la muestra, (P2).
h) Colocar el crisol con la muestra en la estufa durante dos horas a 100°C.
i) Pesar el crisol con la muestra (P3).
j) Obtener la diferencia de P2 y P3, ésta no debe ser mayor a 0.005, de lo contrario repetir los pasos h) e i) hasta que se cumpla esta condición.
k) Aplicar las ecuaciones 5-1, 5-2 y 5-3 para obtener el porcentaje de humedad en la muestra analizada.

$$Peso\ \ fase\ sólida = P1 - (P1 - P3)$$ **Ecuación 5-1**

$$\%\ \ Sólidos = \frac{Peso\ \ fase\ sólida}{P1} x100$$ **Ecuación 5-2**

$$\%\ \ Humedad = 100 - \%\ Sólidos$$ **Ecuación 5-3**

5.1.2 Prueba de granulometría.

La prueba de granulometría sólo se aplica al residuo con la finalidad de calcular el diámetro de partícula promedio de éste. Para la metodología de este análisis se tomo como base la explicada en el trabajo de “Ceramización de metales pesados” (Méndez, 2004); los materiales y las etapas de esta determinación se describen a continuación.

5.1.2.1 Materiales.

- Tamices de diferentes tamaños de malla.
- Balanza analítica.
- Espátula.
- Papel cera.

5.1.2.2 Procedimiento.

a) Colocar los tamices de forma descendente respecto al diámetro de apertura de la malla, es decir si se tuvieran tamices MESH 200, 150, 100, 60, 50 y 35 se tendría que el de 200 (0.074 mm) iría abajo y el de 35 (0.50 mm) arriba. Hasta abajo va un recipiente para evitar pérdidas de muestra.
b) Pesar 20 g o más de la muestra.
c) Colocar la muestra en el tamiz de arriba y agitar horizontalmente de tal forma que se tenga lo menos posible de pérdidas del residuo y hasta llegar a un 100% de muestra tamizada.
d) Pesar la cantidad de residuo que pasa por la abertura de cada malla.
e) Realizar una gráfica de partícula (dp) (usando el número de MESH) vs. porcentaje acumulado (del peso)

5.1.3 Prueba de plasticidad.

La prueba de plasticidad se realiza para determinar cuál es el volumen de agua que se requiere añadir a la mezcla base (arcilla gruesa, arcilla amarilla, barro negro) con el residuo para lograr que dicha mezcla sea moldeable.

5.1.3.1 Materiales.

El material de laboratorio requerido para la prueba de plasticidad es:

- 1 probeta de 100 mL.
- Agua desionizada.
- 1 recipiente de plástico.
- La arcilla amarilla, gruesa y barro negro perfectamente mezclados con el residuo en proporciones que se explicarán en la sección 5.2.1.

5.1.3.2 Procedimiento.

El procedimiento de la prueba es:

a) Colocar en el recipiente de plástico la mezcla de arcilla gruesa, arcilla gruesa, barro negro y el residuo.
b) Colocar en la probeta de 100 mL agua desionizada, tener cuidado de llenarla exactamente con 100 mL para poder medir la cantidad de agua que se va agregando a la mezcla.
c) Añadir el agua desionizada (con la probeta) poco a poco a la mezcla hasta que ésta tenga una consistencia plástica y se pueda moldear fácilmente. Medir la cantidad de agua agregada con la probeta.
d) Aplicar la ecuación 5-4 para calcular el porcentaje de plasticidad.

$$\%\ plasticidad = \frac{Peso\ agua}{Peso\ mezcla\ \sec a} x100$$ **Ecuación 5-4**

5.2 Elaboración de cerámicas.

En la figura 5-2 se muestra el diagrama de flujo del proceso de elaboración de cerámica en la parte experimental. A continuación se profundizará en los materiales y métodos involucrados en cada etapa del diagrama de flujo.

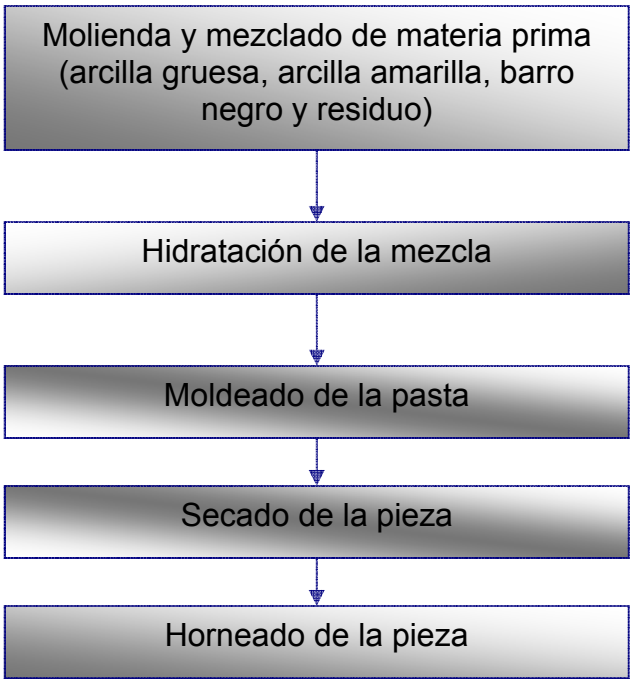

Figura 5-2. Diagrama de flujo de elaboración de cerámica en el laboratorio.

5.2.1 Molienda y mezclado de la materia prima.

Para la elaboración de las cerámicas se requiere establecer la composición de la mezcla base, conformada por arcilla gruesa, arcilla amarilla y barro negro; en el caso se este proyecto se utilizó la proporción manejada en trabajos anteriores (Gutiérrez, 2003; Méndez, 2004); ésta es:

- Arcilla gruesa: 12 %.
- Arcilla amarilla: 50%.
- Barro negro: 38%.

Cabe mencionar, que en tesis previas (Méndez, 2004; Cruz, 2005), el barro empleado fue diferente al manejado en el presente trabajo, éste último es barro negro y de acuerdo a ladrilleros y artesanos con los cuales se tuvo oportunidad de conversar, presenta mayor plasticidad y le da más resistencia a las piezas. En los trabajos previos, el barro utilizado se conoce comúnmente como tepetate.

Por otro lado, la proporción de residuo que se añadió a la mezcla base en la elaboración de la cerámica fue de 15% la cual es la óptima que se obtuvo en el trabajo "Ceramización de metales pesados" (Méndez, 2004).

Primero se realizaron cerámicas sin residuo para verificar que la mezcla de arcilla gruesa, amarilla, barro negro y residuo es la adecuada y que da como resultado piezas que no se rompen ni se cuartean.

Posteriormente, se realizaron en el laboratorio piezas que tenían metales (Cobre, Níquel, Hierro y Cromo), para establecer el porcentaje en masa de dichos metales en las piezas se llevaron a cabo varias pruebas, primero de probaron 1, 3 y 5% p/p, sin embargo, la superficie de las cerámicas presentaba una capa negra; finalmente se fijaron las concentraciones de 0.01 y 0.1% p/p ya que con éstas no se tuvieron problemas respecto a la apariencia de las piezas.

En total se elaboraron 8 piezas, dos concentraciones para cada metal, y sus respectivos duplicados, asimismo, previamente se realizaron 3 con las concentraciones de 1, 3 y 5%, así como 2 piezas sin metal, dando un total de 21 piezas.

La materia prima empleada para la fabricación de la cerámica a nivel laboratorio es:

- Arcilla gruesa.
- Arcilla amarilla.
- Barro negro.

} Mezcla base

- Residuo (arena sílice con alto contenido de carbono).
- Agua.
- Sales metálicas ($CuSO_4 \bullet 5H_2O$, $NiSO_4 \bullet 6H_2O$, $FeSO_4 \bullet 7H_2O$, $K_2Cr_2O_7$).

En la figura 5-3 se muestran los componentes de la mezcla base y el residuo.

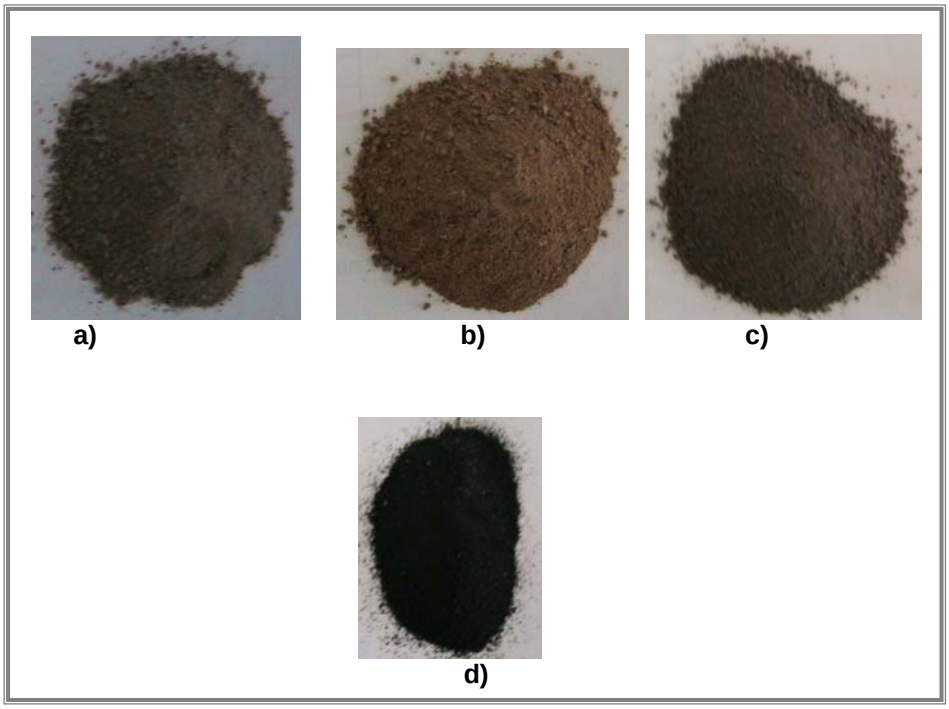

Figura 5-3. Componentes de la mezcla base: a) arcilla amarilla, b) arcilla gruesa, c) barro negro; y residuo industrial: d) arena sílice con alto contenido de carbono.

Las arcillas y el barro se cernieron con un colador, primero se colocaba una cantidad del material en éste y se colaba la materia. Para el mezclado se utilizó una espátula con la cual se agitaban los materiales en un recipiente de plástico.

En el caso de la cerámica a la que se le añadió metales, éstos se agregaron a la mezcla base y el residuo a través de soluciones de las sales para cada metal, para esto se requirió realizar los cálculos considerando la plasticidad de la mezcla

base. Las concentraciones de metal, después de varias pruebas, fueron de 0.01 y 0.1% (porcentaje masa).

Los cálculos para la preparación de las soluciones de sales metálicas se explicarán en la siguiente sección. En la tabla 5-1 se muestran las composiciones de los experimentos.

Tabla 5-1. Tabla de composiciones de los experimentos realizados.

Cerámica	Sal (g)	Residuo (g)	Arena amarilla (g)	Arena gruesa (g)	Barro negro (g)	Mezcla Base (g)	Agua (g)
Sin metal	0.0000	22.46	63.75	15.3	48.45	127.5	**35**
Cerámica 1: 0.01 Cu	0.0589	22.46	63.75	15.3	48.45	127.5	35
Cerámica 2: 0.01 Cu	0.0589	22.46	63.75	15.3	48.45	127.5	35
Cerámica 1: 0.10 Cu	0.5894	22.46	63.75	15.3	48.45	127.5	35
Cerámica 2: 0.10 Cu	0.5894	22.46	63.75	15.3	48.45	127.5	35
Cerámica 1: 0.01 Ni	0.0671	22.46	63.75	15.3	48.45	127.5	35
Cerámica 2: 0.01 Ni	0.0671	22.46	63.75	15.3	48.45	127.5	35
Cerámica 1: 0.10 Ni	0.6714	22.46	63.75	15.3	48.45	127.5	35
Cerámica 2: 0.10 Ni	0.6714	22.46	63.75	15.3	48.45	127.5	35
Cerámica 1: 0.01 Fe	0.0747	22.46	63.75	15.3	48.45	127.5	35
Cerámica 2: 0.01 Fe	0.0747	22.46	63.75	15.3	48.45	127.5	35
Cerámica 1: 0.10 Fe	0.7474	22.46	63.75	15.3	48.45	127.5	35
Cerámica 2: 0.10 Fe	0.7474	22.46	63.75	15.3	48.45	127.5	35
Cerámica 1: 0.01 Cr	0.0849	22.46	63.75	15.3	48.45	127.5	35
Cerámica 2: 0.01 Cr	0.0849	22.46	63.75	15.3	48.45	127.5	35
Cerámica 1: 0.10 Cr	0.8485	22.46	63.75	15.3	48.45	127.5	35
Cerámica 2: 0.10 Cr	0.8485	22.46	63.75	15.3	48.45	127.5	35

Cerámica 1: 0.01 [metal]: Cerámica número uno con concentración de 0.01% p/p del metal.
Cerámica 2: 0.01 [metal]: Cerámica número dos con concentración de 0.01% p/p de metal.
Cerámica 1: 0.1 [metal]: Cerámica número uno con concentración de 0.1% p/p del metal.
Cerámica 2: 0.1 [metal]: Cerámica número dos con concentración de 0.1% p/p de metal.

5.2.2 Hidratación de la mezcla.

Para la hidratación de la mezcla, se añade el agua que se determinó en la prueba de plasticidad, como ya se mencionó, en el caso de que tengan metales las piezas, éstos se añaden a través de soluciones acuosas; para la preparación de éstas se consideró el peso base húmeda de cada cerámica (150 g), así como el volumen de agua determinado en la prueba de plasticidad.

5.2.2.1 Materiales.

Los materiales y reactivos para la preparación de las soluciones y para la hidratación de la mezcla son:

- Matraces aforados 100 mL.
- Guantes de látex.
- Cubre bocas.
- Papel encerado.
- Balanza analítica.
- Vasos de precipitado de 50 mL.
- Pipeta 100 mL.
- Propipeta.
- Sales metálicas ($CuSO_4 \bullet 5H_2O$, $NiSO_4 \bullet 6H_2O$, $FeSO_4 \bullet 7H_2O$, $K_2Cr_2O_7$).
- Agua desionizada.
- Pizeta.

Es importante mencionar que los guantes de látex y los cubre bocas se emplean debido a que se trabaja con sales metálicas de una pureza del 99.9%, lo cual implica que su inhalación o contacto prolongado con éstas es riesgo para la salud.

5.2.2.2 Procedimiento.

Para la preparación de las soluciones de sales metálicas se realizó el siguiente procedimiento:

a) En un matraz aforado de 100 mL se agrega agua desionizada, sin rebasar la mitad del matraz y pesar en una balanza analítica los miligramos de sal determinados. Se recomienda usar papel encerado.

b) Pasar la sal al matraz aforado de 100 mL, para evitar pérdidas se recomienda, con la pizeta, echar agua desionizada al papel de tal forma que ésta caiga dentro del matraz.
c) Aforar el matraz de 100 mL con agua desionizada.
d) En caso de que la sal no se disuelva, calentar la solución sin tener evaporación.
e) En base a los cálculos realizados, con la pipeta se toman los mililitros de solución de sal metálica necesarios para tener la concentración deseada en el ladrillo, y se completa con agua desionizada el volumen de agua determinado en la prueba de plasticidad.
f) Repetir para todas las sales metálicas el procedimiento.
g) Vaciar la solución resultante en un bote de plástico tomando la precaución de identificar su contenido.

La solución resultante en el inciso f) es la que se usa para hidratar la mezcla de los componentes base y el residuo. En caso de que no se desee añadir metales se añade sólo el volumen de agua desionizada determinado en la prueba de plasticidad.

5.2.3 Moldeado de la pasta.

El moldeado consiste en darle la forma deseada a la pasta preparada en el inciso anterior usando moldes de yeso o madera, en este proyecto se utilizó un molde de madera para 16 piezas rectangulares, cada una de dimensiones (LWH): 10.5 x 5 x 3 centímetros.

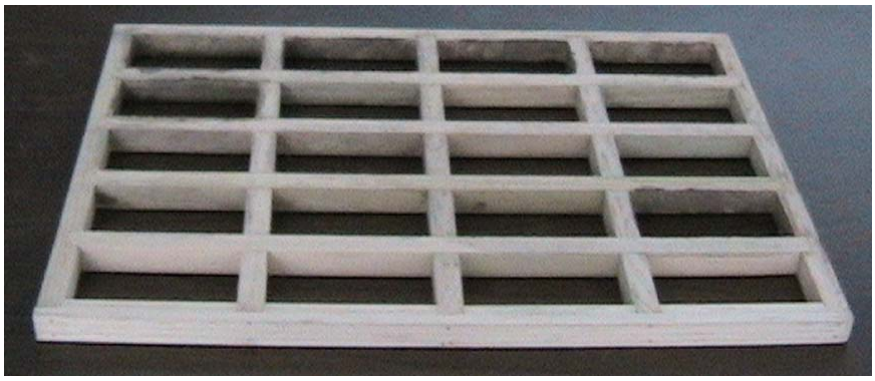

Figura 5-4. Molde de madera empleado en la elaboración de cerámica.

En la figura 5-5 se ejemplifica el llenado del molde con la pasta (mezcla de materias primas y agua).

Figura 5-5. Llenado del molde de madera con la materia plastificada.

5.2.4 Secado de la pieza.

5.2.4.1 Procedimiento.

Una vez que ya se tiene moldeada la pasta y se le da la forma deseada, se procede a secar la pieza con el fin de eliminar la humedad y así poder cocerla. El procedimiento es el siguiente:

a) Dejar el molde con las piezas en la sombra durante 12 horas. Evitar que existan corrientes de aire puesto que se pueden fracturar las cerámicas.

b) En caso de que haya mucha humedad en el ambiente puede utilizarse un ventilador, sin embargo, el aire debe soplar hacia arriba y nunca en dirección del molde.

c) Sacar el molde con las piezas al sol durante aproximadamente durante dos horas, el tiempo exacto depende de la humedad del ambiente.

d) La coloración de las piezas es el factor que indica si están o no secas las piezas, en la figura 5-6 se muestra un ejemplo de una cerámica seca, como se observa, su color es grisáceo.

e) Retirar el molde jalándolo hacia arriba teniendo cuidando de no dañar las piezas y evitando pérdidas; las cerámicas secas sufren una contracción de volumen por lo que existe una separación del molde y éstas.

Figura 5-6. Pieza cerámica después del proceso de secado.

5.2.5 Horneado de la pieza.

5.2.5.1 Materiales.

- Mufla marca Sybron Thermolyne Modelo FA1730 con control de temperatura (FURNATROL) mostrada en la figura 5-7.
- Guantes de asbesto.
- Lentes con protección para la radiación.

Figura 5-7. Mufla marca Sybron Thermolyne Modelo FA1730 con control de temperatura (FURNATROL).

5.2.5.2 Procedimiento.

a) Una vez de que se desmoldan las piezas, se meten a la mufla, en la tabla 5-2 se muestran los intervalos de temperatura utilizados.

Tabla 5-2. Intervalos de temperatura para la cocción de la cerámica.

Temperatura (°C)	Tiempo (min)
70	60
140	60
400	90
700	90
900	90
Total (min)	390
Total (h)	6.5

Fuente: Villareal, J. (2004). Uso de lodo de papel y arena sílice para la fabricación de ladrillos y tabla roca.

b) Transcurridas las 6.5 horas de cocción se empieza a bajar la temperatura gradualmente, a este proceso se conoce como templado y se debe tener precaución puesto que las piezas pueden cuartearse. Los intervalos de temperatura y los tiempos están indicados en la tabla 5-3.

Tabla 5-3. Intervalos de temperatura para el templado de la cerámica.

Temperatura (°C)	Tiempo (min)
900	60
750	90
500-100	120 aprox.
Total (min)	270
Total (h)	4.5

c) Cuando se llega a la temperatura de 900°C se apaga la mufla para que se enfríe totalmente. El control de la mufla no puede ajustarse a una temperatura menor a 100°C puesto que se vuelve inestable y no se mantiene en el *set point*.

Figura 5-8. Pieza cerámica cocida.

5.3 Prueba de extracción (PECT).

Para la prueba de extracción (PECT) se siguió la metodología descrita en la Norma Oficial NOM-053-SEMARNAT-1993 en la fase de toxicidad (T del CRETIB). Esta etapa experimental se realiza para determinar si se sobrepasa los límites de concentración de metales indicados en la Norma Oficial NOM-052-SEMARNAT-1993 que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

5.3.1 Materiales.

- Potenciómetro para medir pH.
- Termómetro (150-200°C).
- Vidrio de reloj.
- Parrilla de calentamiento.
- Agitador elíptico.
- Pipeta 100 mL.
- Propipeta.
- Matraz aforado 1 L.
- Vaso de precipitado 100 mL.
- Matraces Erlenmeyer 250 mL con tapones de corcho.
- Matraz Erlenmeyer 400 mL con tapón de corcho.
- Sistema de vacío Kitazato.
- Cinta teflón.
- Papel parafilm.
- Equipo de agitación tipo elipse.
- Bomba de vacío.
- Papeles para filtración (diferentes tamaños de poro).
- Frascos de plástico 250 mL.
- Refrigerador.

5.3.2 Reactivos.

- Ácido clorhídrico 1.0 N.
- Ácido nítrico 1.0 N.
- Hidróxido de Sodio 1.0 N.
- Ácido acético glacial.
- Agua desionizada.

5.3.3 Procedimiento.

El procedimiento de la prueba de extracción se describe a continuación, en necesario mencionar que la norma indica dos formas: para componentes volátiles y los no volátiles, en este trabajo, sólo se requiere aplicar el segundo método.

a) Preparación de los dos reactivos de extracción:

- Reactivo de extracción 1: 5.7 mL de ácido acético glacial, 64.3 mL de hidróxido de sodio 1 N, aforar a 1 L de agua desionizada, el pH de la solución debe estar entre 4.93 ± 0.05.
- Reactivo de extracción 2: 5.7 mL de ácido acético glacial, aforar a 1 L con agua desionizada; el pH debe estar entre 2.88 ± 0.05.

b) Selección del reactivo de extracción para cada muestra.

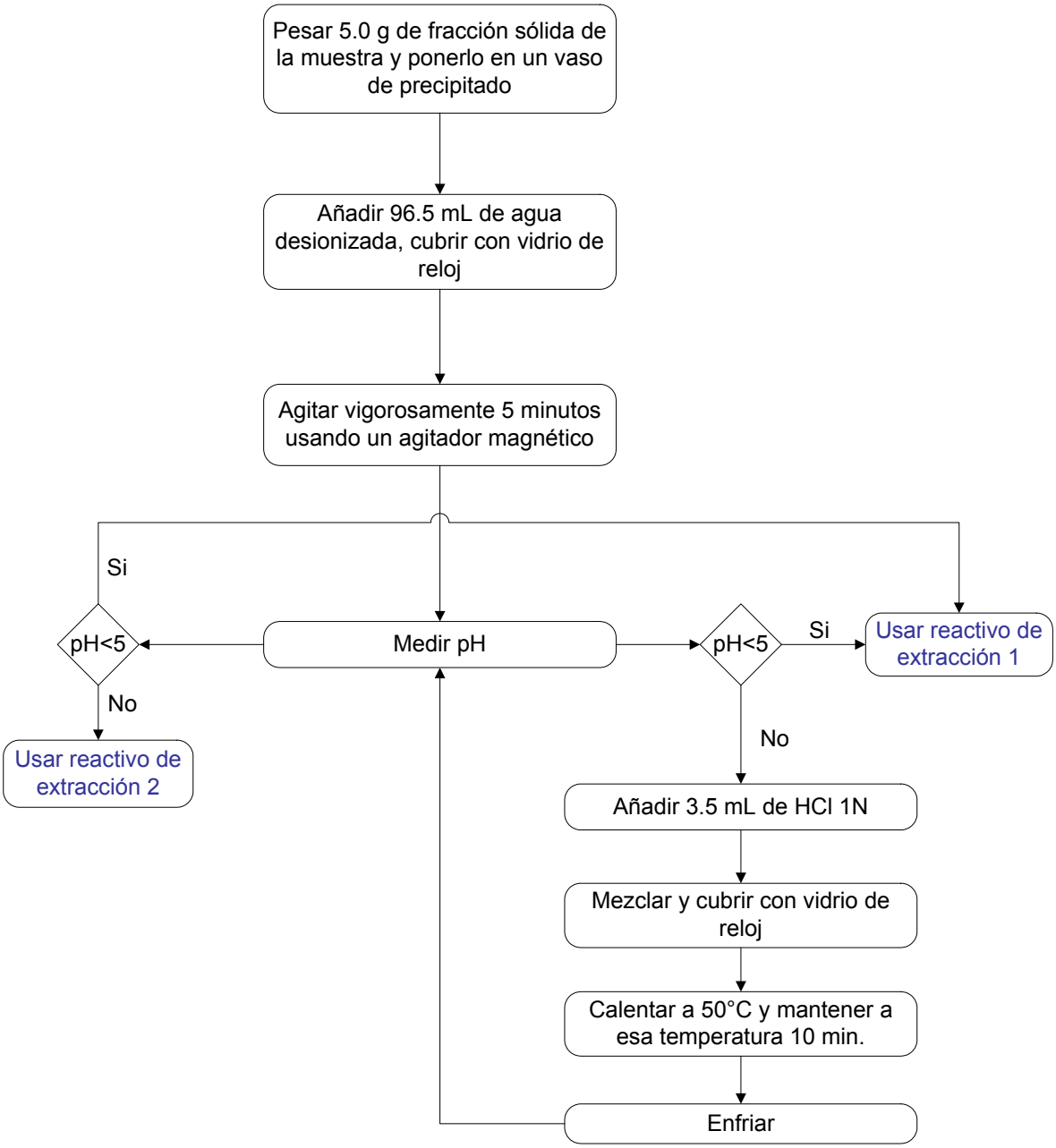

Figura 5-9. Diagrama del flujo para la selección del reactivo de extracción.

c) Para el caso de las cerámicas tomar 100 g y colocarlos en un matraz Erlenmeyer de 250 mL; para el residuo se toman 150 g y se ubican en un matraz Erlenmeyer de 400 mL.

d) Agregar a cada una de las muestras y al residuo el reactivo de extracción determinado en el inciso b). El volumen que se agrega debe ser el suficiente para que la muestra esté totalmente sumergido en el reactivo.

e) Cerrar herméticamente los matraces Erlenmeyer con el tapón de corcho y adicionalmente se sella con cinta de teflón y papel parafilm la unión del tapón y el matraz.

f) Colocar los matraces en el equipo de agitación rotatorio como el mostrado en la figura 6-10 a 60 rpm durante 24 horas. Es necesario que la temperatura se mantenga a 23 ± 2°C.

g) Filtrar los extractos PECT, se puede utilizar un sistema similar al de la figura 6-11; envasar los filtrados en frascos de plástico.

h) Acidificar los extractos hasta que tengan un pH menor a 2 y refrigerarlos a una temperatura de 4°C, esto se realiza para conservar los extractos hasta por 14 días.

Figura 5-10. Equipo de agitación rotatorio con las muestras.

Figura 5-11. Equipo de filtración al vacío.

5.4 Determinación de la concentración de metales en el lixiviado por absorción atómica.

Después de filtrar los extractos (lixiviado) se procede a determinarles su concentración de metal según corresponda de acuerdo a la solución de sal que se haya añadido a la cerámica durante su preparación.

5.4.1 Materiales.

Los materiales que se usan en esta etapa de la parte experimental del trabajo son:

- Balanza analítica.
- Papel encerado.
- Matraz aforado de 250 ml.
- Matraz aforado de 100 ml.
- Matraz aforado de 1L.
- Micropipeta de capilar.
- Capilares de 200 µl.
- Espectrofotómetro de absorción atómica modelo VARIAN SpectrAA 220 FS.
- Lámparas para determinar los metales Cu, Ni, Fe y Cr marca VARIAN.
- Botes de plástico de 100 y 250 ml.
- Pipeta 100 mL.
- Propipeta.

5.4.2 Reactivos.

- Sales metálicas grado reactivo (CuSO4•5H2O, Ni(NO3)2•6H2O, Fe(NO3)3•9H2O, Cr(NO3)3•9H2O).
- Acido nítrico concentrado.
- Agua desionizada.

5.4.3 Procedimiento.

El procedimiento para determinar la concentración de metales por absorción es:

a) Preparación de las soluciones patrón para cada metal a determinar, aforando con agua desionizada en un matraz de 250 mL. En la tabla 5-4 se muestran los gramos requeridos de cada sal.

Tabla 5-4. Gramos de sal para preparar las soluciones patrón.

Metal	Sal	Cantidad de Sal (g)
Cobre	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	0.491
Níquel	$Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	0.619
Hierro	$Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$	0.904
Cromo	$Cr(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$	0.962

b) Se prepara una solución con 10 mL de ácido nítrico concentrado y se afora con agua desionizada en un matraz de 1L.

c) Preparar las soluciones estándar que se usarán para generar las curvas de calibración. Los cálculos de los microlitros necesarios para las concentraciones elegidas se muestran en la tabla 5-5. Con la micropipeta se toman los volúmenes determinados y se aforan en matraces de 100 mL con la solución preparada en el inciso b).

Tabla 5-5. Volumen de solución patrón para las soluciones estándar.

Metal	Concentración (ppm)	Solución patrón (µL)
Cobre	1	200
	2	400
	3	600
	4	800
	5	1000
Níquel	1	200
	2	400
	3	600
	4	800
Hierro	2	400
	5	1000
	10	2000
	15	3000
	20	4000
Cromo	1	200
	2	400
	3	600
	4	800
	5	1000

d) Los volúmenes de solución patrón sobrantes, así como las soluciones estándar preparadas se depositan en botes de plástico que están identificados con una etiqueta que indique el contenido y su concentración.

e) Se prende el equipo de absorción atómica y se precalientan las lámparas (por separado, cada metal es una corrida diferente). Como las lámparas marca Varian para determinar Cu, Ni, Fe y Cr son nuevas no requieren precalentamiento.

f) Se optimizan las lámparas y se lee el blanco (solución de ácido nítrico del inciso b).

g) Las soluciones estándar se leen en el aparato de absorción atómica mostrado en la figura 5-12 para generar las curvas de calibración, después se analizan las muestras problema.

Figura 5-12. Aparato de absorción atómica marca Varian.

5.5 Prueba de resistencia a la compresión.

Por medio de la prueba de resistencia a la compresión se determina cuál es el esfuerzo máximo que soportan las cerámicas realizadas.

5.5.1 Materiales.

Los materiales para realizar la prueba de resistencia a la compresión son:

- Prensa Universal marca Olsen.
- Azufre.
- Parrilla con control de temperatura (200°C).
- Bandeja de acero inoxidable.
- Guantes de asbesto.
- Campana de extracción.
- Lija.
- Plancha.
- Espátula.
- Estopa.
- Grasa.

5.5.2 Procedimiento.

El método para la prueba de resistencia a la compresión incluye los siguientes pasos:

a) Medir las dimensiones de las piezas (largo y ancho).
b) Verificar que las piezas tengan una superficie lisa, sino es así, lijarla hasta tener una superficie lo más uniforme posible. Lo anterior se efectúa con la finalidad de que no se alteren los resultados de la prueba ya que si no están planas las caras de las piezas, los abultamientos serán los puntos ocasionarán que la pieza se rompa más rápido en estas zonas. Para asegurarse que la superficie de la pieza esté uniforme se usa la técnica de cabeceado que consiste en las etapas descritas del inciso c) al f).
c) Aplicar azufre en un recipiente de acero y calentarlo en la parrilla a 200°C hasta que llegue a una consistencia líquida, una vez que este líquido se mantiene a 100°C.
d) Después se limpia la plancha con estopa y grasa para evitar que se pegue en ésta el azufre al enfriarse, se coloca el azufre en la plancha. Se requiere usar guantes de asbesto para evitar quemaduras.
e) Se colocan las piezas en la plancha, este proceso debe ser rápido puesto que el azufre se solidifica vertiginosamente.
f) Se desmolda con precaución ya que la capa de azufre se rompe fácilmente. Quitar lo sobrante de azufre procurando que éste cubra toda la superficie de la pieza para tener mayor precisión en la determinación de resistencia.
g) Con la prensa universal se mide la fuerza que se requiere aplicar a cada pieza para generar daños en su estructura. La ecuación 5-5 se aplica para obtener la resistencia.

$$\sigma = \frac{Fuerza\ aplicada}{(Largo\ de\ pieza)(Ancho\ de\ pieza)}[=]\frac{Kg_f}{cm^2}$$ **Ecuación 5-5**

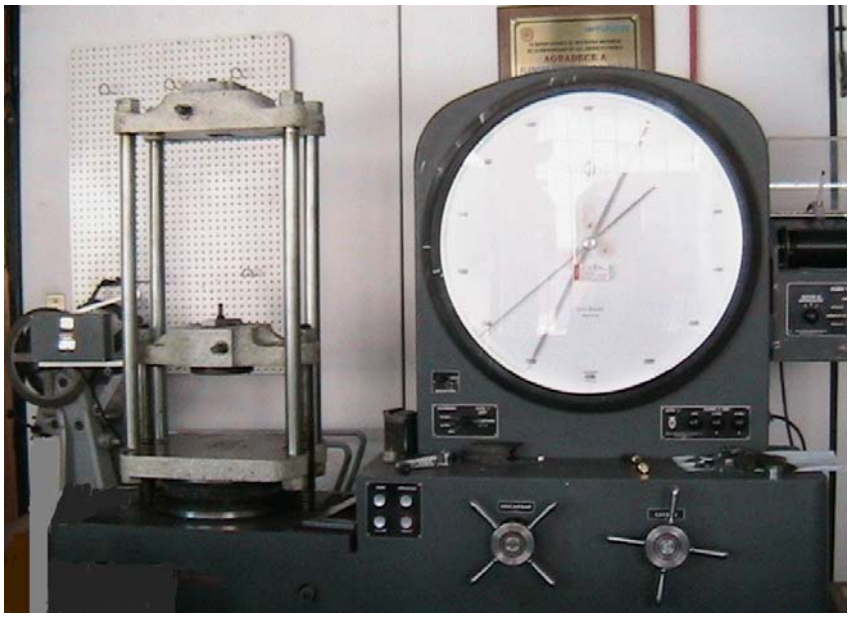

Figura 5-13. Prensa universal marca Olsen utilizada para la prueba de resistencia a la compresión.

5.6 Investigación de Campo.

En este proyecto se realizó una investigación de campo en el cual se visitaron talleres de cerámica y se entrevistaron a personas que conocen y han trabajado durante varios años en éstos; con la finalidad de conocer más a fondo el proceso de elaboración de cerámica así como entender sus limitaciones a nivel artesanal.

5.6.1 Materiales.

- Directorio Telefónico.
- Teléfono.
- Videocámara digital.

5.6.2 Metodología.

a) Búsqueda en el directorio de información acerca de talleres de cerámicos, teléfonos y nombres de personas.
b) Asistencia al 1er Simposium Internacional de Talavera y sus raíces el 18, 19 y 20 de noviembre del 2004.
c) Establecer contacto telefónico con algunos encargados de talleres y concertación de citas.
d) Formulación de las preguntas que se iban a realizar a los encargados de los talleres. Los puntos que se abarcaron durante las entrevistas son:

- Materias primas y sus proporciones.
- Forma de amasado.
- Forma de moldeo.
- Tipo de secado.
- Tiempos de secado.
- Tipo de cocción.
- Horno de cocción.
- Tiempos de cocción.
- Formas de decoración.
- Preparación del esmalte y colorantes.
- Proporciones de esmaltes y colorantes.
- Nivel de producción.

e) Visitas a los talleres y entrevistas a los encargados.
f) Filmación del proceso de elaboración de cerámica en un taller, desde preparación de la materia prima hasta el esmaltado y decoración de las piezas.

Los lugares que se visitaron, así como los contactos se mencionan a continuación.

- Talavera del Ángel. Atención del Sr. Prisciliano Coyotl Temalatzi. Dirección: Xicohtencatl No. 361, Barrio el Cristo. San Pablo del Monte, Tlaxcala. Tel. (222) 2 82 10 69.
- Talavera de la Reyna. Atención de Sria. Otilia Garcés. Dirección: Camino a la Carcaña 2413, Recta a Cholula, Cholula, Puebla. Tel. (222) 229 38 53.
- Taller de Cerámica el Conde. Atención del Sr. Joaquín Conde. Dirección: Miraflores 622-B Col. Campeche. Puebla, Puebla. Tel. (222) 2 33 4178.
- Uriarte Talavera S.A. de C.V. Atención del Sr. Uriarte. Dirección: Av. 4 Pte. No. 911. Colonia Centro. Puebla, Puebla. Tel. (222) 2 46 40 91.
- Cerámica de Talavera Pedro Tecayehuatl. Atención del Sr. Pedro Tecayehuatl. Dirección. Priv. 38 Ote. 3815. Col. Hidalgo. Puebla, Puebla. Tel. (222) 2 32 85 56.

Cabe mencionar, que el video filmado del proceso artesanal se realizó en el Taller de Talavera del Ángel y se incluye como anexo a este proyecto de tesis.

5.7 Diseño del taller y selección de equipo.

El equipo que se diseñó fue el horno ya que es la parte crítica del proceso en cuanto a energía se refiere, por otro lado, la capacidad del horno se estableció considerando que por cuestiones de consumo de combustible se va a realizar una cocción a la semana de tal forma que se cumpla con la producción de 4,800 piezas mensuales que se fijaron como base de diseño.

Es importante mencionar que la base de producción se fijó de acuerdo a la información proporcionada por la Secretaría de Economía, específicamente en las guías empresariales que se encuentran disponibles en su página de Internet, considerando que la producción es artesanal. Los detalles se encuentran en el siguiente capítulo en la sección 6-6 correspondiente al diseño del taller.

Por otro lado, se efectuó una revisión de los proveedores de hornos para la cocción de cerámica TERMIMEX y COMESA para determinar los materiales aislantes que se pueden utilizar en los hornos, a partir de dicha revisión se decidió usar fibra cerámica y ladrillo refractario. Es necesario establecer primero los materiales de los cuales estará construido el horno puesto que para determinar la cantidad de combustible requerido se calculan las pérdidas de energía por las paredes del horno por los mecanismos de conducción y convección.

A continuación se presentan las ecuaciones empleadas en el diseño del horno de acuerdo a la capacidad establecida de 1,200 piezas semanales. Por otro lado, el combustible considerado para el diseño es gas LP ya que contamina menos comparándolo con los combustóleos, el gas natural se descartó porque hoy en día el gas LP es el más utilizado.

Para calcular la cantidad de calor total requerido se tiene que:

$$Q_{Total} = Q_{cocción} + Q_{transferido} + Q_{evaporación}$$ **Ecuación 5-6**

En donde:

Q_{Total}= Cantidad total requerido.

$Q_{cocción}$= Cantidad de calor para la cocción de la cerámica.

$Q_{transferido}$= Calor necesario para compensar las transferencias de calor al entorno por conducción y convección.

$Q_{evaporación}$= Calor de evaporación del agua.

En la determinación del calor transferido por conducción, la ecuación general es:

$$Q_{fibra,acero} = \frac{(T_{interior} - T_{exterior})}{\frac{S_{fibra}}{k_{fibra}A_{fibra}} + \frac{S_{acero}}{k_{acero}A_{acero}} + \frac{S_{ladrillo}1}{k_{ladrillo}A_{ladrillo}}}$$ **Ecuación 5-7**

En donde:

$T_{interior}$: Temperatura al interior del horno.

$T_{exterior}$: Temperatura al exterior del horno.

$S_{[material]}$: Espesor del material.

$K_{[material]}$: Conductividad térmica del material.

$A_{[material]}$: Área que ocupa el material.

En el caso del calor transferido por el mecanismo de convección, se tiene que:

$$Q_{fibra} = \frac{(T_{exterior} - T_{aire})}{\frac{1}{h_{aire} A_{fibra}}}$$ **Ecuación 5-8**

En donde:

h_{aire}: coeficiente de convectividad del aire.

T_{aire}: Temperatura del aire.

Para la determinación del coeficiente de convectividad del aire se tiene:

$$h_{aire} = \frac{Nu_f k}{L}$$ **Ecuación 5-9**

En donde:

Nu_f: Número de Nusselt para una superficie vertical.

L: Longitud de la pared.

El número de Nusselt se determina con la siguiente ecuación:

$$Nu_f = C(Gr_f \Pr)^m$$ **Ecuación 5-10**

En donde:

C y m: Constantes de superficies isotérmicas, función de Gr_f y Pr.

A su vez se tiene que:

$$Rayleigh = Gr_f \Pr = \frac{g\beta(T_a - T_b)L^3}{v^2} \Pr$$ **Ecuación 5-11**

En donde:

β: Coeficiente de expansión volumétrica.

g: Aceleración por la gravedad.

v: Viscosidad cinemática del aire.

T_a: Temperatura de la superficie.

T_b: Temperatura del medio ambiente.

De forma similar, para determinar la cantidad de calor absorbida por los diferentes componentes de la cámara de combustión se tiene:

$$Q_{[material]} = mC_{p_{[material]}}\left(T_2 - T_1\right)$$ **Ecuación 5-12**

En donde:

$Q_{[material]}$: Calor absorbido por ese material.

m: Peso del material.

$C_{p[material]}$: Calor específico del material.

T_1: Temperatura inicial.

T_2: Temperatura final.

Por otro lado, después del proceso de secado, el 9% del agua no se evapora y se enlaza químicamente, durante el horneado de las piezas, de ese 9%, el 5% se evapora a los 100°C y el restante, 4%, que está unido por cadenas químicas, se desprende totalmente aproximadamente a los 550°C (Hamilton, 1989); para calcular la energía requerida para lograr toda la evaporación del agua se tiene que:

$$Q_{agua_1} = 0.05P_t\left(h_{agua}\right)$$ **Ecuación 5-13**

$$Q_{agua_2} = 0.04P_t\left(h_{agua}\right)$$ **Ecuación 5-14**

$$Q_{aguat} = Q_{agua_1} + Q_{agua_2}$$ **Ecuación 5-15**

En donde:

Q_{agua}: Calor requerido para evaporar el agua del lote de cerámicas.

Q_{agua1}: Calor para evaporar el agua mezclada en el barro.

Q_{agua2}: Calor para evaporar el agua enlazada químicamente.

h_{agua}: Calor de evaporación del agua.

P_t: Peso total del lote de cerámicas.

Después de obtener la cantidad de calor requerido total, se calcula la cantidad de combustible necesario aplicando la siguiente ecuación:

$$F = \frac{Q_{tot}}{(P_{c_{gas}})}$$ **Ecuación 5-16**

En donde:

Q_{tot}: Calor total requerido.

F: Cantidad de combustible necesario.

P_{cgas}: Poder calorífico del gas LP.

En la tabla 5-6 se muestran los valores de las constantes utilizadas en las ecuaciones 5-7 a la 5-16.

Tabla 5-6. Valores de constantes para el cálculo de cantidad de combustible.

Nombre	Simbología	Valor	
Calor específico acero	C_{acero}	0.1075	Kcal/Kg°C
Calor específico fibra cerámica	C_{fibra}	0.25	Kcal/Kg°C
Calor específico ladrillo refractario	$C_{ladrillo}$	0.27	Kcal/Kg°C
Calor específico CO_2	C_{CO2}	1.126	KJ/Kg°C
Calor específico H_2O	C_{H2O}	2.142	KJ/Kg°C
Calor específico N_2	C_{N2}	1.108	KJ/Kg°C
Calor específico CO	C_{CO}	1.131	KJ/Kg°C
Calor específico SO_2	C_{SO2}	0.784	KJ/Kg°C
Calor específico NO_2	C_{NO2}	1.09	KJ/Kg°C
Coeficiente de conductividad térmica acero	k_{acero}	58	W/mK
Coeficiente de conductividad térmica fibra	k_{fibra}	0.08653	W/m°C
Coeficiente de conductividad térmica ladrillo	$k_{ladrillo}$	0.3	Kcal/mh°C
Coeficiente de conductividad térmica aire	k_{aire}	0.02545	W/m°C
Coeficiente de convectividad aire	h_{aire}	7.678941	W/m^{2}°C
Densidad de la fibra cerámica	ρ_{fibra}	96.11	Kg/m^3
Densidad del ladrillo	$\rho_{ladrillo}$	768.88	Kg/m^3
Poder calorífico gas LP	P_{cgas}	23230	$Kcal/m^3$
Temperatura en el interior del horno	Tinterior	1000	°C
Temperatura en el exterior del horno	Texterior	35	°C
Constante de superficie isotérmica	C	0.1	-
Constante de superficie isotérmica	m	0.3333	-
Número de Prandtl para el aire	Pr	0.707	-
Viscosidad cinemática del aire	v	1.59E-05	m^2/s

5.8 Análisis económico.

Para realizar el análisis económico se realizaron proyecciones de los ingresos y gastos anuales del taller de acuerdo al nivel de producción fijado, los resultados se detallan en la sección 6-7. En la determinación del costo de inversión inicial para la instalación se cotizaron los equipos seleccionados con diferentes proveedores con el fin de tener puntos de comparación. Los parámetros financieros como la tasa de interés, de inflación, de depreciación y de impuestos, se obtuvieron de la información proporcionada por el periódico el Financiero y por el Banco de México. De forma similar, el salario mínimo que se consideró para calcular los gastos por este concepto se obtuvo de la Comisión Nacional de Salarios Mínimos.

Se manejaron dos criterios para establecer la factibilidad económica del proyecto: el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), a continuación se explica cada uno.

- **Valor presente neto (VPN).** Este método considera el valor del dinero en el tiempo y compara el valor presente de los beneficios de un proyecto contra el valor de la inversión inicial. Cuando el VPN es positivo, el proyecto es viable ya que cubre la inversión y genera beneficios adicionales. Cuando el valor presente neto es negativo, el proyecto debe rechazarse ya que los beneficios esperados no cubren la inversión inicial. Lo cual se resume en:

Si VPN > 0 se acepta el proyecto.

Si VPN < 0 se rechaza el proyecto.

La fórmula para determinar su valor es:

$$VPN = \sum_{t=1}^{n} \frac{Rt}{(1+i)^n} - Inversión\ inicial \qquad \textbf{Ecuación 5-17}$$

En donde:

R = flujos de efectivo.

t = períodos de tiempo que van desde 1 hasta n.

i = tasa de rendimiento esperada.

Las ventajas de este método es que considera el valor del dinero en el tiempo, así como todos los flujos de efectivo y la contribución esperada en términos absolutos.

- **Tasa interna de rendimiento (TIR).** Es un método que considera el valor del dinero en el tiempo y determina la tasa de rendimiento en la cual el valor presente neto de un proyecto es igual a cero.

La ecuación 5-18 se utiliza para determinar el valor de la Tasa Interna de Retorno (TIR).

$$TIR = \sum_{t=1}^{n} \frac{Rt}{(1+i)^n} - Inversión\ inicial = 0$$ **Ecuación 5-18**

En donde:

R = flujos de efectivo.

t = períodos de tiempo que van desde 1 hasta n.

i = tasa de rendimiento esperada.

Las ventajas de este método son las consideraciones del valor del dinero en el tiempo, los flujos de efectivo, y que no requiere una tasa de descuento.

Para tomar la decisión de aceptar o rechazar el proyecto en función de la TIR, es necesario comparar su valor contra la Tasa de Rendimiento Mínima Atractiva (TREMA) fijada para este proyecto. Existen varias formas de establecer la TREMA, éstas difieren entre sí por las tasas que consideran, así como la

posibilidad de incorporar el riesgo considerado por los inversionistas, para este trabajo utilizó la ecuación 5-19 ya que se requieren conocer tasas que son de dominio público y se reportan diario en los periódicos.

$$TREMA = Tasa\ CETES + Tasa\ \inf lación + (T.CETES * T.Inflación)$$ **Ecuación 5-19**