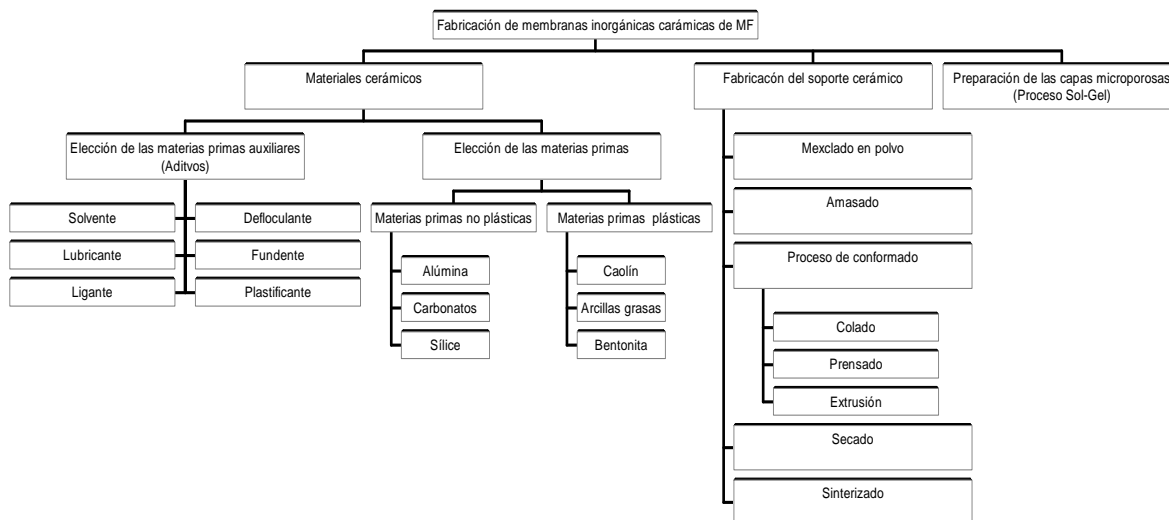


**MEMBRANAS INORGÁNICAS CERÁMICAS PARA  
 MICRO Y ULTRAFILTRACIÓN  
 (DOCUMENTO 5)**

**Prof. Aldo Saavedra – Prof. Julio Romero**

**1. Introducción.**

Se llama cerámica a todo material de ingeniería, productos o partes que poseen una composición química inorgánica, exceptuando los metales y aleaciones. Están compuestos por especies catiónicas y aniónicas, diferenciándose de otros materiales naturales por la estructura de sus enlaces químicos. La cerámica posee una gran rigidez, dureza y estabilidad térmica (Davis,1979). El proceso de fabricación de una membrana inorgánica cerámica se muestra en el siguiente esquema:



**Fig. 1. Fabricación de una Membrana Cerámica Asimétrica Soportada.**

**2. Materias primas.**

La mayoría de las materias primas son de origen natural, sin embargo la cerámica tradicional incluye procesos químicos para la preparación de cerámica sintética. La desventaja de las materias primas naturales es su falta de homogeneidad, influyendo fuertemente en la calidad del producto final. Las materias primas de las cerámicas pueden ser plásticas o no-plásticas. Las materias primas plásticas se utilizan en pastas cerámicas para darles propiedades de moldeado y resistencia en seco. Se utilizan además materias primas fundentes, que en general no suelen ser plásticas. La proporción

de unas u otras no es fácil de determinar, y cada proceso requiere ser caracterizado con el detalle particular suficiente (Gippini,1979).

## 2.1 Materias primas plásticas.

Se llama "arcilla", a los depósitos térreos naturales que poseen la propiedad de la elasticidad, que se caracterizan por ser de grano fino y al ser mezclados con agua adquieren una consistencia plástica. Las arcillas están constituidas por silicatos alumínicos hidratados y otros minerales presentes en proporciones variables. Algunas arcillas son (Singer,1979):

**Caolín:** Es una arcilla de calcinación blanca, generalmente de baja plasticidad y alta refractariedad. Están principalmente constituidos por caolinita, siendo su formula estructural,  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ .

**Arcilla grasa:** Son arcillas refractarias plásticas sedimentarias de color oscuro, en estado no-calcinado, debido a las impurezas orgánicas, pero blancas o de tono crema después de la calcinación. Se utilizan en materiales blancos para hacer la pasta más plástica y moldeables.

**bentonita:** Es una roca rica en montmorrillonita, posee residuos de feldespatos, cuarzos originarios de las rocas madres. La bentonita posee una alta capacidad de hinchamiento, es extremadamente plástica, tiene un bajo punto de fusión y se emplea fundamentalmente como plastificante.

## 2.2 Materias primas no-plásticas.

Las materias primas no-plásticas permiten modificar propiedades como tiempo de secado, dureza, resistencia del cuerpo no cocido y también la resistencia del cuerpo cocido. Los tipos de materias primas no-plásticas son:

**Alúmina:** Es un importante material cerámico, sus propiedades químicas, refractarias y de dureza permiten un amplio espectro de aplicaciones, entre los cuales se encuentran la fabricación de materiales cerámicos resistentes a la abrasión y químicamente estables bajo gran exigencia térmica (MacZura,1979), como la preparación de membranas de filtración. En el presente trabajo se utilizaron membranas de este tipo de material.

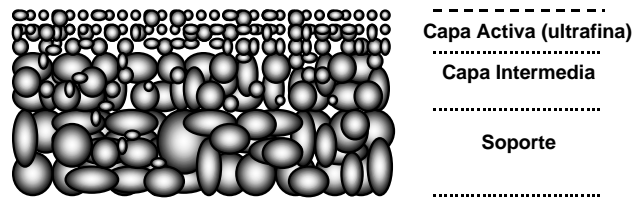
La alúmina tiene dos formas, alfa y gama. Los minerales hidratados que existen en la naturaleza corresponden a estas formas. La alúmina gama se produce por deshidratación controlada a baja temperatura de los hidratos, alcanzando las temperaturas hasta 500°C. Por calentamiento fuerte se convierte irreversiblemente en la forma alfa a 1150-1200°C. La alúmina pura, encuentra innumerables usos en cerámica fina, para productos eléctricos (debido a su muy baja conductividad eléctrica).

**Carbonatos:** Es un material refractario, reacciona con la sílice y la sosa para dar productos de bajo punto de fusión, actuando como fúndente en pastas. En general reacciona con la arcilla, feldespatos, para dar una masa vítrea, la cual tiene mayor resistencia y menor porosidad (Singer, 1979).

**Sílice:** La sílice ( $SiO_2$ ), es un componente principal de las pastas cerámicas para la fabricación de lozas, porcelanas etc. El silicio aparece formando el óxido, ya sea libre o combinado con metales formando silicatos, los silicatos son prácticamente insolubles en cualquier solvente, pero es fácilmente soluble en medios alcalinos.

### 3. Características de los Soportes Cerámicos.

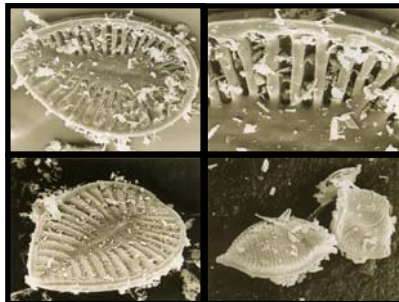
Un soporte cerámico es una estructura (tubo o placa, dependiendo de la forma de la membrana que se desee obtener) en el cual se van a depositar una o más capas de una membrana inorgánica (las cuales realizan la filtración) como se observa en la siguiente figura.



**Fig. 2.. Estructura de una Membrana Cerámica Asimétrica Soportada.**

Un de las principales ventajas que deben poseer los soportes cerámicos porosos, es que deben ser químicamente inertes, no biodegradables y no deben contener carbón orgánico que pueda ser utilizado como fuente para el desarrollo de microorganismos (Judd,1990). Es muy importante tener presente en un soporte la morfología del poro. En los soportes cerámicos porosos las propiedades mecánicas son críticas en el diseño, estas propiedades determinan la forma de uso de los materiales y el tiempo de vida de los soportes cerámicos. Entre las propiedades que se deben considerar están: la resistencia a la abrasión, la resistencia a la compresión, a la flexión, etc. (Ortega,1995).

Aunque los productos de tierra de diatomeas han sido utilizados por décadas como ayuda filtrantes, abrasivos, materiales aislantes, etc., sólo solo en los últimos años a sido considerado su utilidad como soporte. Se pueden usar diatomitas (roca sedimentaria que consiste en esqueletos de diatomeas, están compuestas por caparazones de algas acuáticas microscópicas unicelulares, tienen una densidad volumétrica en seco de 8 a 12 lb/pie<sup>3</sup> y contienen partículas, en su mayoría inferior a 50 µm) como fuente de sílice para el soporte. La porosidad de un cuerpo formado a partir de diatomita presenta una porosidad fina, constituida por los poros intraparticulares propios del esqueleto de la diatomea y una porosidad gruesa interpartícula cuyo diámetro depende del procesamiento del material (Ortega,1995). En el extremo norte de Chile se explotan yacimientos de diatomita, de los cuales se comercializan productos bajo la marca DIATIV, como se observa en la siguiente figura.



**Fig.3. Fotografía de las Diatomitas comercializadas por la empresa DIATIV (DIATIV,1992).**

La composición química de la diatomita corresponde a SiO<sub>2</sub>, con las impurezas que

caracterizan el depósito. A continuación en la siguiente tabla, se muestra su composición química promedio en % base seca:

**Tabla 1. Composición química de la diatomita (DIACTIV,1992).**

COMPUESTO	COMPOSICIÓN PORCENTUAL
SiO <sub>2</sub>	70 - 90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 - 5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 - 2
TiO <sub>2</sub>	0.1
CaO	0.2 - 8
MgO	0.2 - 2
Na <sub>2</sub> O - K <sub>2</sub> O	0.05 - 0.85

### 3. Materias primas auxiliares en la fabricación Cerámica.

La mayor parte de los cerámicos, que se fabrican apartir de polvos, contemplan un moldeado inicial del polvo y consolidación mediante sinterización. El moldeado resulta posible únicamente si el polvo es convertido en una pasta homogénea. Debido a ello es necesario agregar al polvo inorgánico, algunos compuestos orgánicos que en presencia de agua, permiten la aglomeración de los granos, a fin de producir una pasta de las propiedades requeridas para el moldeado. Estos compuestos orgánicos, que son eliminados en el proceso de cocción, tiene funciones ligantes, aglutinantes o plastificantes entre otras. Finalmente, la consistencia dura del cuerpo se alcanza en el proceso de cocción o sinterización (Ortega, 1995).

#### Aditivos.

La función de los aditivos incorporados en los diferentes procesos cerámicos, es modificar el comportamiento y propiedades de los materiales durante dicho proceso. El uso clásico de los aditivos orgánicos tiene por objeto obtener una película de SiO<sub>2</sub> continua, evitando trizaduras durante el secado y en las primeras etapas del quemado (Smith, 1962). Los aditivos pueden proporcionar una o más propiedades en el proceso, al material cerámico, como por ejemplo:

**Solvente:** Promueve fluidez al sistema particulado y disuelve las sales, compuestos y sustancias orgánicas presentes en el medio. Las sustancias surfactantes son agregadas para reducir la tensión superficial de los líquidos o la tensión superficial entre las superficies de la partícula y el líquido, mejorando el mojado y la dispersión (Reed, 1988). Principalmente se utiliza agua, pero pueden ser utilizados líquidos orgánicos si el proceso lo requiere.

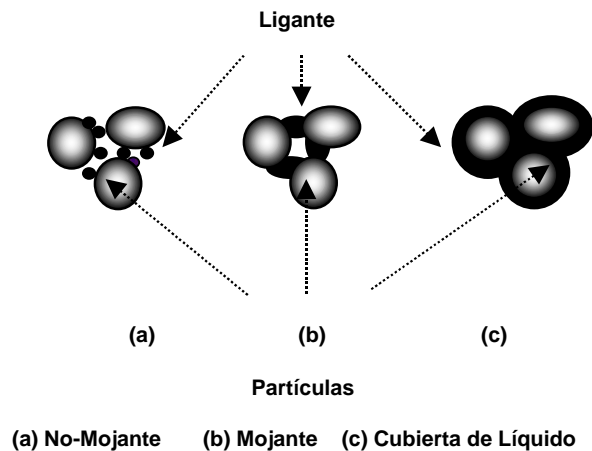
**Defloculante:** Da una estabilidad a las partículas en suspensión debido al impedimento estérico y repulsión electrostática.

**Ligante:** Son llamados ligantes, las moléculas poliméricas y partículas coloidales coaguladas,

que son absorbidas por las partículas cerámicas y que permiten mejorar la floculación interpartícula. Un ligante absorbido puede incrementar significativamente la viscosidad aparente, retardar la razón de arreglo de las partículas, mejorar la plasticidad de la masa y reducir proporcionalmente la migración del líquido, colaborando en su retención, (Ortega,1995).

Los ligantes se clasifican de acuerdo a la posición en que ellos se encuentren alrededor de las partículas, como se muestra en la siguiente figura.

**Fig. 4. Ubicación de los ligantes alrededor de las partículas (Marchese, 1995).**



Debido a su composición los ligantes pueden ser orgánicos o inorgánicos. Los ligantes orgánicos tienen su mayor aplicación en la cerámica avanzada, como por ejemplo, los alginatos, que son ligantes preparados a partir de algas marinas, solubles en agua fría o caliente, dando soluciones coloidales viscosas, pero que son vulnerables al ataque de bacterias y hongos lo cual exige el uso de formalina o similares para evitar el crecimiento de colonias (Smith, 1962). Otro tipo de ligantes son aquellos derivados de la celulosa, entre los cuales se encuentran los de carácter iónico como la carboximetilcelulosa (CMC) y los éteres no-iónicos, metilcelulosa (MC), hidroxipropilmetilcelulosa (MHPC), hidroxipropilcelulosa (HPC), hidroxietilcelulosa (HEC), entre otros (Burnfield, 1989).

**Plastificantes:** Mejoran las propiedades de las pastas, modificando sus propiedades de viscosidad, improvisan la distribución de los ligantes, causando la flexibilidad de la pasta cruda. La plasticidad está influenciada por el tipo de arcilla, la cantidad de agua que ha recibido la mezcla, el tipo de contacto entre la arcilla y el agua, la temperatura, etc. Dicha propiedad está relacionada con la finura de las partículas, en que se presentan los minerales y notablemente más, con su carga y capacidad de intercambio de catión, de las cuales se derivan sus fuerzas relativas de atracción y de repulsión. Los minerales de alta capacidad de intercambio poseen elevada plasticidad. La plasticidad relativa de algunos minerales de arcilla se ha clasificado en el orden creciente como sigue (Singer, 1979):

Dickita < Illita < Nontronita < Hectorita < Caolinia < Montmorrillonita.

**Lubricantes:** Se utilizan para ayudar en el moldeado de pastas cerámicas y para impedir que la pasta se adhiera en la superficie de la matriz de extrusión. Un lubricante es un surfactante que se absorbe fuertemente y es efectivo en reducir los coeficientes de fricción de las partículas. De acuerdo

a las especificaciones de cada aplicación, se pueden sugerir combinaciones de uno o más productos químicos que colaboran con la adición de un producto dado. Tal es la acción de los glicoles que pueden actuar en las pastas cerámicas mejorando sus propiedades de escurrimiento (Brown, 1980).

**Fundentes:** Son minerales reactivos de bajo punto de fusión, que facilitan la maduración de las pastas cerámicas a temperaturas inferiores. También existen metales alcalinos, como el litio, sodio y potasio, además los metales alcalinos térreos como el calcio, estroncio, bario, zinc, que poseen una acción semejante. En general el litio actúa como fúndente, reduciendo la temperatura de sinterización (Fishwick, 1974).

## 5. Fabricación de soportes cerámicos.

Una membrana inorgánica puede formarse por la deposición de una o más capas finas (barbotina), sostenida sobre una estructura macroporosa (soporte), que debe proveer cierta resistencia mecánica. En forma resumida, la fabricación de una membrana cerámica tubular comprende las siguientes etapas: Fabricación del soporte macroporoso tubular y Deposición de una o varias capas de una suspensión de partículas cada vez más finas, según los requerimientos del tamaño de poro final (Ortega, 1995). La última capa se puede lograr utilizando la técnica del Sol - Gel, mediante la combinación de compuestos orgánicos como los alcoholes inorgánicos (Porter, 1990).

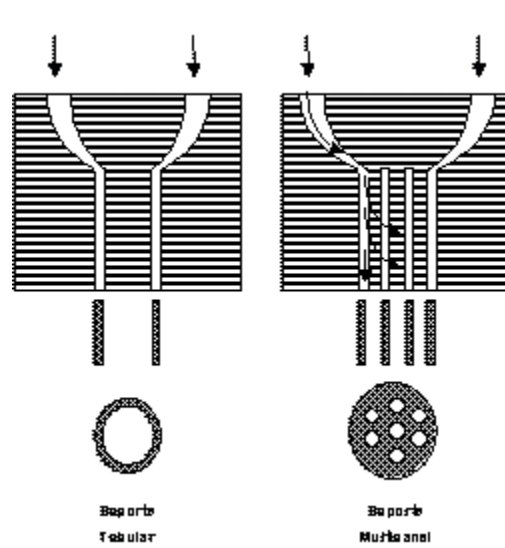
- a) **Mezclado del polvo:** La mezcla es una etapa esencial para obtener una buena dispersión y una perfecta homogeneidad, con una distribución uniforme de los constituyentes. El mezclado de las materias primas cerámicas puede ser en un medio líquido, como dispersante, o directamente en polvo, siendo el mezclado en líquido el de mayor uso en la industria cerámica tradicional. La selección del diseño del mezclador de sólidos en polvo debe considerar las diferentes alternativas: el molino de bolas, el mezclador de doble cono o cilindros unidos entre otros. Otro criterio de la selección del equipo de mezclado en seco está dado por la fragilidad de las diatomeas, que descarta el uso del molino de bolas para el mezclado, ya que podría alterar la granulometría requerida de la materia prima (Ortega, 1995).
- b) **Mezclado de alto corte o Amasado:** Los materiales son comúnmente preparados en batch, mezclando las materias primas ya homogéneas, aditivos y el medio líquido o agente mojante en un mezclador de alto corte o amasador, para obtener una pasta uniforme donde existe un mejor revestimiento de las partículas con el agua como agente humectante (Singer, 1979). El amasado de pastas se realiza con sistemas mecánicos apropiados a materiales de alta viscosidad, como pueden ser amasadores de hoja acoplados a extrusores de tornillos, entre otros diseños (Reed, 1988).
- c) **Procesos de conformado:** Atendiendo a las características de conformado, pueden definirse dos tipos de procesos: aquellos en los que las características de las pastas se alteran durante la toma de la forma y aquellos en que no se registra un cambio sustancial. Al primer tipo pertenece la conformación mediante colado por barbotina, utilizando un moldeado de yeso absorbente del agua. El segundo tipo pertenece al prensado y a la extrusión, ya que dentro de los límites normales no altera la proporción de agua en la pasta. En la extrusión, la característica reológica más importante es la plasticidad, la cual permite que el cuerpo pueda ser deformado al aplicar una fuerza y se mantenga esa deformación cuando la fuerza aplicada se retira (Ortega, 1995).

La colada consiste en la adición cuidadosa de productos químicos a la pasta para producir una

barbotina que tenga buenas propiedades de flujo con un contenido de agua mínimo, la cual se transporta y vierte en moldes de yeso en donde la doble acción de eliminación de agua y floculación, por el sulfato cálcico del molde, hace que la pasta endurezca. Luego es secada la pieza colada y se contrae separándose de las paredes del molde. El proceso de colada es utilizado para moldear cualquier tipo de pasta, desde loza fina hasta materiales refractarios. También puede utilizarse para pastas no tradicionales, que no contengan arcillas, mediante adición adecuada de aglutinantes, como es el caso de óxidos puros: óxido de zirconio, alúmina, magnesia, óxido de titanio, aluminatos, etc.

La técnica del prensado se realiza colocando un polvo en un molde y aplicando una presión tal que logre la compactación. En el prensado isostático, el soporte es cargado en un contenedor, el cual es colocado en un recipiente cerrado, lleno con un líquido con el cual se aplica la presión. Con esto se consigue aplicar la presión en todas las direcciones y el material es uniformemente compactado. El proceso isostático puede ser en frío o caliente.

En la extrusión de las pastas los parámetros más importantes son el tamaño de los granos cerámicos, la naturaleza y proporción de los aditivos orgánicos. La reacción entre un polvo y otro puede ser muy distinta, por ende la proporción de una pasta con características reológicas satisfactorias es muy empírico. En la siguiente figura se representa la fabricación de tubos mediante la técnica de extrusión.



**Fig. 7. Representación esquemática de la fabricación de tubos por extrusión (Marchese, 1995).**

- Los defectos en las pastas conformadas por extrusión se pueden atribuir a tres causas:
- a) Calidad deficiente de la materia prima utilizada.
  - b) Homogeneización insuficiente de la pasta.
  - c) Roce entre las partes metálicas del sistema de extrusión y la pasta.

Los defectos se pueden observar en la forma de:

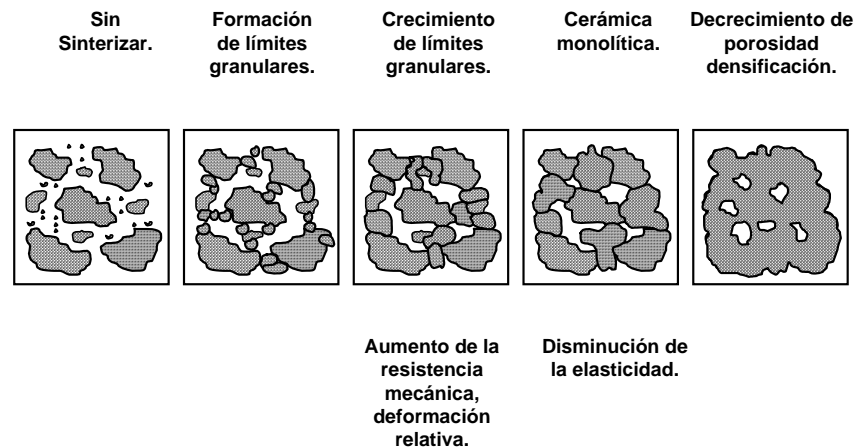
- a) Cráteres superficiales, formados con la expulsión de aire atrapado en la pasta.
- b) Laminaciones superficiales, producidas por el roce entre la pasta y las partes metálicas de la matriz.
- c) Enroscamiento del extrusado, debido a la falta de uniformidad en la densidad de la masa o producida por la fricción de las paredes metálicas.

**Secado:** Los productos por modelación, procesamiento de pastas y conformados plásticos, deben ser secados de manera de remover el líquido intersticial en una etapa anterior al quemado (Kingery, 1958). El secado en la industria cerámica se realiza principalmente en cámaras donde se regula la humedad y temperatura para la deshidratación uniforme de las piezas en reposo. El secado de piezas tubulares exige la mantención de una rectitud del tubo y una uniformidad del diámetro, para lo cual se requiere un secado homogéneo, manteniendo constantes los coeficientes de transferencia de calor, evitando de esta forma cualquier torsión o flexión del tubo (Larbot, 1993).

**Sinterizado:** En esta etapa ocurren reacciones entre partículas sólidas individuales de una sustancia para dar un producto duro, menos poroso y tamaño algo menor, tal como se observa en la siguiente figura. Este proceso ocurre cuando la temperatura en el material es equivalente a  $1/2$  o  $2/3$  de la temperatura de fusión.

La sinterización es un proceso que se produce por etapas, primeramente ocurren las reacciones de presinterizado. Durante el calentamiento y antes de iniciarse el proceso de sinterización, se producen una serie de cambios en el material que pueden incluir secado, descomposición de los ligantes orgánicos, vaporización de agua, etc. (Ortega, 1995).

La fuerza impulsora del proceso de sinterizado es la reducción de la energía libre del sistema, la cual depende del área específica del material. Durante el sinterizado el área específica disminuye como resultado de la iniciación y crecimiento de contactos entre partículas, también la reducción de volumen (Reed, 1988).



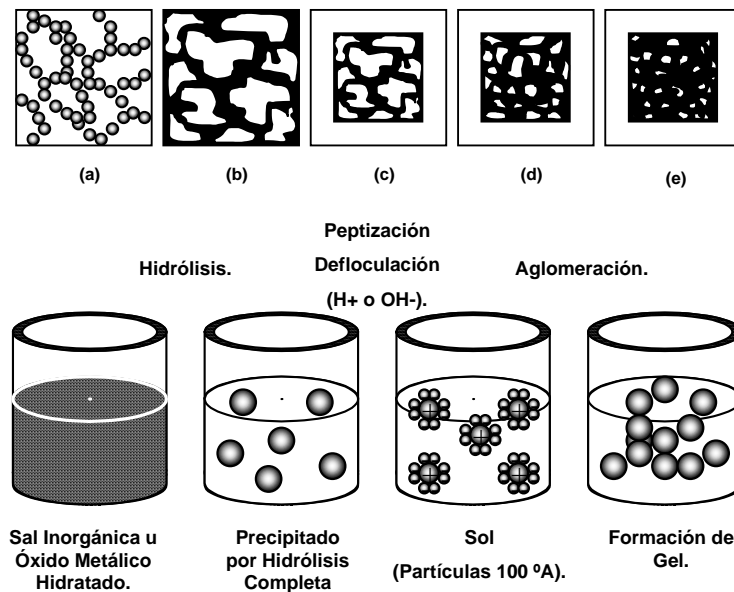
**Fig. .8. Evolución textural y resistencia mecánica con la temperatura en el proceso de sinterizado (Marchese, 1995).**

## 6. Preparación de membranas microporosas mediante el proceso de sol - gel.

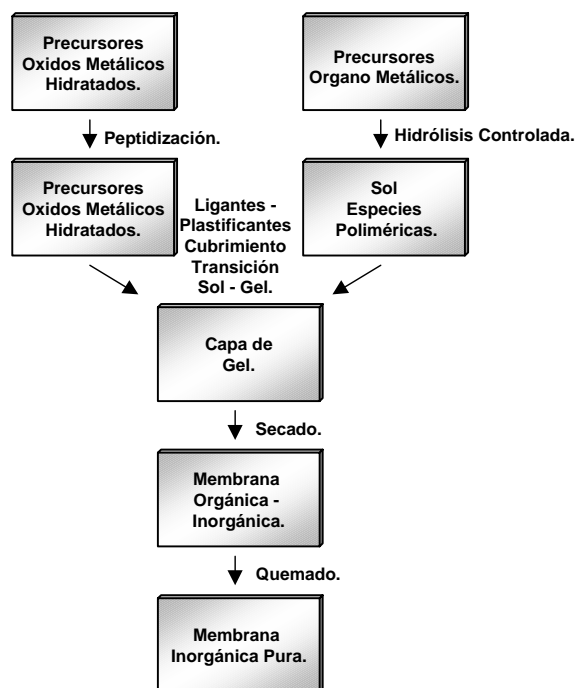


Las ventajas de este método son la posibilidad de formar un gel homogéneo molecularmente, a partir de mezclas de distintos óxidos coloidales, moldeando en la forma deseada. Las desventajas de los compuestos derivados orgánicos hidrolizables es que son muy costosos y los cuerpos moldeados se fisuran en el secado debido a su contracción. El objetivo de esta técnica, es hacer que las partículas que se contactan tengan diámetros del orden de nanómetros (Marchese, 1995).

En concentraciones adecuadas las partículas forman una red tridimensional que llena la fase líquida como un gel. En las siguientes figuras se presenta el proceso final y la formación de las membranas inorgánicas mediante el proceso Sol - Gel.



**Fig. 9. Proceso Sol - Gel, (a) partículas coloidales de 3-4 nm de diámetro, formando un gel tipo red; (b) las partículas coalicionan en cadenas endureciendo el cuerpo; (c) el gel se contrae a medida que se va secando; (d) y (e) posterior contracción y cierre de poros durante el sinterizado hasta obtener un cuerpo libre de poros (Marchese, 1995).**



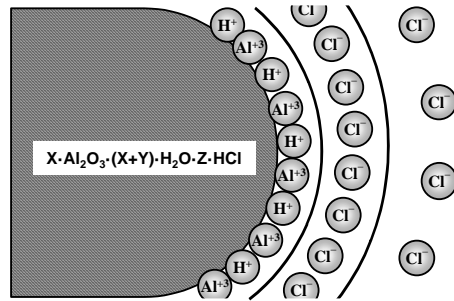
**Fig. 10. Formación de membranas inorgánicas mediante el proceso Sol - Gel (Marchese, 1995).**

### **Influencia de la química del precursor.**

Los precursores pueden ser de dos tipos, dependiendo de la ruta de la técnica de Sol - Gel:

- a) Sales metálicas en medio acuoso.
- b) Compuestos organometálicos en medios orgánicos.

En ambos casos ocurre una condensación en el sol para la formación de las partículas. Un catión  $M^{+n}$  disuelto en agua, está solvatado por esta, en un medio acuoso no complejante. Existen tres posibilidades de cómo se genere la unión, la primera es que este unido a ligantes-acuo ( $OH_2$ ), ocurriendo esto para cationes de baja valencia ( $n < 4$ ), otra posibilidad es que este unido a ligantes-hidroxo ( $OH^-$ ), ocurriendo esto para cationes que poseen una valencia ( $n < 4$ ), formando complejos hidroxo-acuo o hidroxo en todo el rango de pH; ahora si  $n > 5$ , forma complejos hidroxo-oxo y por ultimo es que esté unido a ligantes-oxo ( $O^-$ ), ocurriendo para cationes de alta valencia ( $n > 5$ , formando complejos oxo o hidroxo-oxo, en todo el rango de pH). En el caso de los cationes con  $n=4$  (tetraivalentes), están en el límite de las posibilidades, por lo tanto pueden producir una gran cantidad de precursores. La formación de los soles esta relacionada a dos factores, el primero es la relación entre el pH (o  $[OH^-]/[M^{n+}]$ ) y el potencial Z y el segundo es que los iones metálicos tengan una relación alta entre la carga y el radio, condicionando estos factores la unión de  $OH_2$ ;  $OH^-$ ;  $O^-$  (Marchese, 1995).



**Fig. 11. Doble capa alrededor de la partícula de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  peptizada por  $\text{HCl}$ , (Marchese, 1995).**

La hidrólisis en fase acuosa esta dada por:



Las condensaciones de los precursores hidrolizados pueden ocurrir mediante una reacción de olación (sustitución nucleofílica), o por medio de una reacción de oxolación (adición nucleofílica con o sin pérdida de un grupo  $\text{OH}^-$ ). En fase acuosa la reacción de condensación, en el caso de olación esta dada por (Marchese, 1995):



### **Influencia de la microestructura del gel.**

Una vez que el sol ha sido bañado sobre el soporte, se forma una capa de gel, donde se pueden describir dos formas distintas de gel, unos son los geles físicos en los cuales el efecto estérico o electrolito en el sol dominan la formación del gel, encontrándose principalmente en medios acuosos, y están caracterizados por la manera que se acomodan las partículas durante el proceso, otros son los geles poliméricos, estudiados generalmente en medios orgánicos, estando caracterizados por las velocidades y extensiones de las reacciones químicas de polimerización.

Las capas en el gel polimérico tienen una red tridimensional en la etapa de gel debido a que son producidas a través de un crecimiento secuencial, la evaporación del solvente y las reacciones de entrecruzamiento determinarán la estructura final. Es importante tener claro que durante la remoción del solvente la red colapsa gradualmente. Sí ocurre separación de fase, la estructura original del gel no está ligada a la del gel original, pero si no ocurre, se obtienen geles con volúmenes de poro pequeño (Marchese, 1995).

## 7. Aspectos operacionales en Microfiltración Cross - Flow.

Existen diversos factores que afectan la productividad y eficiencia de separación del proceso de microfiltración, tales son:

**Diferencia de presión transmembrana:** La diferencia de presión transmembrana,  $\Delta P$ , está definida como el gradiente de presión que existe entre la alimentación y el permeado. Esta diferencia no es constante en todos los puntos de la membrana, debido a las pérdidas de carga que se producen en el módulo, particularmente por el lado de la alimentación. Una buena aproximación para determinar  $\Delta P$  es mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta P = \left( \frac{P_A + P_C}{2} \right) - P_P \quad (2.1)$$

donde:  $P_A$  = Presión absoluta de entrada de la alimentación.

$P_C$  = Presión absoluta de salida de la alimentación (concentrado).

$P_P$  = Presión absoluta del permeado.

En ausencia de incrustación, la diferencia de presión es proporcional al flujo de permeado. Durante la microfiltración de sustratos alimenticios, por ejemplo una pulpa de fruta, a partir de una cierta presión de operación el flujo de permeado se tornará independiente del valor de  $\Delta P$ . Bajo tales condiciones se estará en la zona de gelificación de la capa límite, fenómeno que determinará la incrustación de la membrana (Matthiasson, 1983).

**Temperatura de proceso:** La velocidad de permeado aumenta con la temperatura de operación debido a que disminuye la viscosidad del flujo de permeado que pasa a través de los poros de la membrana (Rao et al., 1984). Además, la temperatura influye en la solubilidad de los solutos y a partir de un cierto valor, puede promover cambios químicos en materiales biológicos que se estén procesando.

**Velocidad de flujo:** La velocidad de flujo de la alimentación es un factor relevante por cuanto determina el grado de turbulencia al interior del módulo de membrana. En tal sentido, es recomendable operar a la mayor velocidad posible, teniendo como restricción la resistencia mecánica de los componentes del equipo de membrana.

**Compatibilidad química de las membranas:** La compatibilidad entre membranas y fluidos de proceso debe considerarse. Es particularmente importante en membranas poliméricas, que presentan restricciones químicas a agentes oxidantes, aceites, grasas, ciertos iones metálicos, ácidos, bases, solventes industriales e hidrocarburos. Para el caso de membranas inorgánicas, las restricciones químicas son mucho menores.

**Compactación:** Las membranas poliméricas operando bajo presión pueden presentar deformación debido a compactación mecánica, lo cual provoca disminución del flujo de permeado (Apuntes, 1994). En membranas inorgánicas esta situación no se presenta.