

### 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Transferencia de calor por convección

La transferencia de calor por convección se produce cuando existe una diferencia de temperaturas entre el fluido y la superficie. Existen dos clases de convección; la natural y la forzada. En la primera, una superficie transfiere calor a un fluido y éste disminuye su densidad provocando un movimiento en el fluido. Mientras que la convección forzada se produce al introducir un instrumento como una bomba que modifique el movimiento del fluido (Karlekar, 1985). En esta tesis sólo se estudia la convección natural debido a que durante los experimentos no es necesario utilizar ningún equipo para mover el fluido.

Isaac Newton desarrolló la ecuación básica para relacionar la transferencia de calor con la diferencia de temperaturas entre una superficie y un fluido, ver ecuación 3.1 (Welty, 1974).

$$q = hA(T_{\text{sup}} - T_{\text{fluido}}) \quad \text{Ec. 3.1}$$

En donde  $q$  es el calor transferido de la superficie al fluido y se expresa regularmente como Btu/h o W,  $A$  se refiere al área de la superficie que está en contacto con el fluido expresandose en  $\text{m}^2$  o  $\text{ft}^2$ ,  $h$  es el coeficiente convectivo de calor promedio con unidades Btu/h-pie<sup>2</sup>°F o  $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ,  $T_{\text{sup}}$  es la temperatura de la superficie y  $T_{\text{fluido}}$  es del fluido circundante. La ecuación anterior no corresponde a la transferencia por convección, sino únicamente define el coeficiente convectivo de calor (Desmon R. M., 1985).

La ecuación 1 se modifica para obtener un área infinitesimal ( $dA$ ) con el fin de poder partir el área en diminutas porciones, para tener una mayor precisión. ver ecuación 3.2 y 3.3 (Desmon R. M., 1985)

$$dq = h dA(T_{\text{sup}} - T_{\text{fluido}}) \quad \text{Ec. 3.2}$$

### III. Revisión bibliográfica

---

$$q = (dQ / dA) = h(T_{\text{sup}} - T_{\text{fluido}}) \quad \text{Ec. 3.3}$$

El coeficiente convectivo no se considera una propiedad intrínseca del material, debido a que cambia su magnitud de un problema a otro, además es afectado por factores como; la velocidad, densidad, viscosidad, conductividad térmica, el calor específico del fluido, geometría de la superficie, además de las fuerzas de flotamiento entre otras. (Bejan, 1976).

Existen equipos experimentales que son utilizados para obtener el coeficiente convectivo y estudiar los factores que modifican su magnitud. El equipo básico que se utiliza está equipado con tanque que puede ser llenado con cualquier fluido, en el interior cuenta con una resistencia la cual funciona por medio de energía eléctrica. Se puede variar el suministro de energía por medio de un reóstato y se puede medir por medio de un amperímetro o voltímetro (ver fig. 3.1). Para hacer funcionar este equipo es importante dejar pasar la energía (P) y tomar el tiempo hasta que la temperatura de la cámara se vuelva constante.

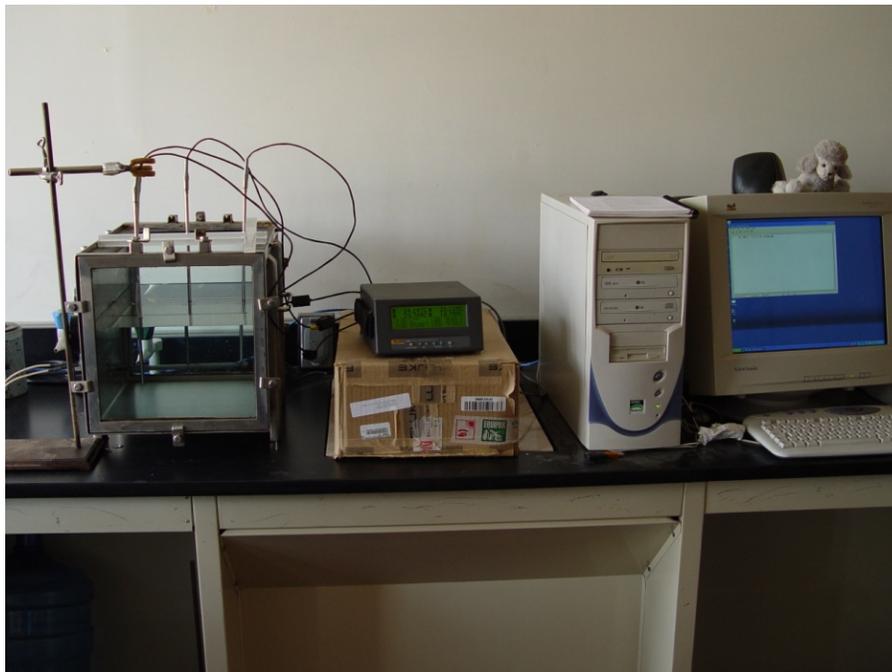


Figura 3.1 Instrumento básico para obtener el coeficiente de convección.

### III. Revisión bibliográfica

---

Para entender el funcionamiento de este equipo es necesario relacionar la energía que se le proporcionó a la resistencia con la primera ley de la termodinámica. La energía (P) que adquirió la placa se transformó en calor por conducción ( $Q_{\text{conducción}}$ ), convección ( $Q_{\text{convección}}$ ) y radiación ( $Q_{\text{radiación}}$ ) dentro del tanque (ver Ec. 3.4) (Karlekar, 1985).

$$P = Q_{\text{CONDUCCIÓN}} + Q_{\text{CONVECCIÓN}} + Q_{\text{RADIACIÓN}} \quad \text{Ec. (3.4)}$$

La transferencia de calor por conducción se considera mínima debido a que los alambres del termopar son muy pequeños en su sección transversal por lo tanto la transferencia será mínima. También, se elimina la transferencia de calor por radiación porque el área de la resistencia ( $A_p$ ) es muy pequeña en comparación al área de la superficie del tanque, siendo el calor que se transporta al alejarse de la resistencia muy pequeño. (Desmond, 1985).

Si el tanque se encuentra totalmente aislado entonces las temperaturas de la superficie de la resistencia y el fluido son iguales (Desmond, 1985). Entonces para conocer el coeficiente de convección es necesario despejarlo de las ecuaciones de transferencia de calor por convección (Ec. 3.5) y de radiación (Ec. 3.6)

$$h = \frac{Q_{\text{conv}}}{A_p (T_{\text{resistencia}} - T_{\text{fluido}})} \quad \text{Ec. 3.5}$$

$$h = \frac{P - Q_{\text{rad}}}{A_p (T_{\text{resistencia}} - T_{\text{fluido}})} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Si se incrementa la cantidad de energía ( $P$ ) suministrada a la resistencia, la temperatura de la ésta también aumenta, provocando un incremento en el coeficiente convectivo. Mientras que si se presenta un aumento del área de la resistencia ( $A_p$ ), el coeficiente convectivo disminuirá.

Los experimentos del tanque aislado con la resistencia son relativamente fáciles de realizar y no se requiere de cálculos complejos para obtener el coeficiente convectivo.

#### **3.2 Transferencia de calor por ebullición**

La transferencia de calor por ebullición se considera el mecanismo para transferir calor de mayor importancia, debido a que se pueden transferir grandes cantidades de calor en el cambio de fase (líquido-gas-líquido). Los fenómenos de ebullición y condensación no son considerados como transferencia de calor por convección, pero son importantes para entender los flujos de calor dentro de la cámara. Debido a la diferencia de temperaturas en estos procesos es necesario incorporar el coeficiente convectivo (Welty, 1974).

La figura 3.2.1 muestra la diferencia de temperaturas en función de la energía transferida a un alambre calentado eléctricamente. Dicha figura se utiliza para explicar la transferencia de calor en ebullición cuando una superficie es calentada por medio de electricidad y un fluido que se encuentra en estado saturado.

Para el estudio se ha dividido en 6 diferentes fases. La primera fase que va de los puntos (a – e') se conoce como “convección natural”, en esta fase la diferencia de temperaturas entre el líquido y sólido es pequeña. La segunda es la que está formada por los puntos (e' - e) y toma el nombre de “Burbujas de la ebullición nuclear”, esto significa que se han formado burbujas sobre la superficie sólida.

Al seguir aumentando la temperatura del sólido se llega a la fase cuatro (e – f) tomando el nombre de “Ebullición en núcleos”, en esta fase las burbujas son desprendidas de la superficie sólida y con frecuencia se elevan. A la fase cinco (f – g') se le conoce como

### III. Revisión bibliográfica

“ebullición de película”, esta ocurre cuando la superficie del sólido se encuentra cubierta por vapor. A los puntos (g – g’) se les conoce como “régimen de ebullición de película estable” y se caracteriza en la disminución de la curva de ebullición. La fase seis (g – h) se observa cuando la diferencia de temperaturas es muy grande, lo que ocasiona que se transfiera calor por medio la radiación, lo que no es conveniente para el estudio del coeficiente convectivo. (Welty, 1974)

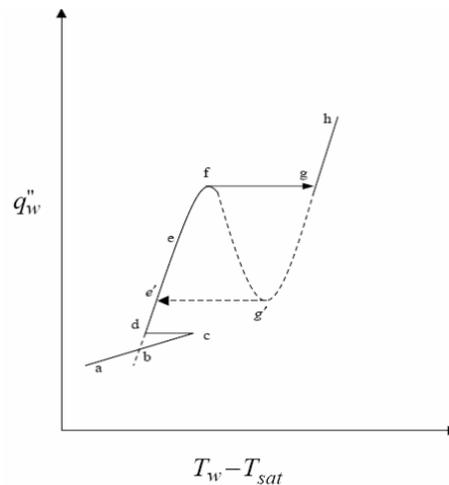


Figura 3.2.1 Curva de ebullición. Diferencia de temperaturas vs la energía transferida en forma de calor.

### 3.3 Coeficiente Convectivo

Durante años se han realizados estudios para obtener ecuaciones que simplifican y ayuden a calcular el coeficiente convectivo, uno de los primeros que se intereso en encontrar una correlación fue J. N. Addoms quien estudió la ebullición estable de núcleos dentro de un estanque y en 1952 Rohsenow utilizó los datos de Addoms para desarrollar una ecuación empírica (Ec. 3.3.1) para la ebullición en núcleos. (Hsu,1963)

### III. Revisión bibliográfica

---

$$\frac{c_{\rho L}(T_0 - T_{sat})}{h_{fg}} = csf \left[ \frac{q/A}{h_{fg}} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)}} \right] \quad \text{Ec. 3.3.1}$$

Donde los subíndices L y v son las fases en saturación, el término de csf es una constante que se obtiene por medio de la regresión realizada por Rohsenow quien junto con Griffith desarrollaron la ecuación (Ec. 3.3.2) que correlaciona la máxima transferencia de calor.

$$\frac{(q/A)_{\max}}{\rho_v h_{fg}} = 143g^{1/4} \left( \frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v} \right) \quad \text{Ec. 3.3.2}$$

En la década de los 50's, Bromley desarrolló una ecuación que correlaciona la ebullición constante dentro del estanque para tubos horizontales. (Ec. 3.3.3)

$$h = 0.62 \left[ \frac{k_v^3 \rho_v (\rho_L - \rho_v) g (h_{fg} + 0.4c_{pv} \Delta T)}{D_0 \mu_v (T_0 - T_{sat})} \right]^{1/4} \quad \text{Ec. 3.3.3}$$

En donde  $K_v$  es el coeficiente de transferencia de calor por conducción,  $\rho_v$  y  $\rho_l$  es la densidad del líquido y del vapor,  $h_{fg}$  es el coeficiente convectivo,  $D_0$  es el diámetro externo.

Kandlikar menciona que el flux de calor crítico es identificado como un fenómeno hidrodinámico y también menciona que debido a las diferentes investigaciones llevadas a cabo, la característica de la superficie del sólido juega un papel muy importante en transferencia de calor.

### III. Revisión bibliográfica

---

En 1948 Kutateladze, mencionó que la generación de burbujas en una superficie horizontal se da en la condición de flujo crítico de calor e igualmente relacionó los fenómenos hidrodinámicos con la disminución de la estabilidad de las dos fases cerca de la superficie sólida. Kutateladze también desarrollo la siguiente ecuación (Ec. 3.3.4). (Kandlikar, 2001).

$$k = \frac{q''_c}{h_{lg} \rho_{lg}^{0.5} [\sigma g (\rho_l - \rho_g)]^{1/4}} \quad \text{Ec. 3.3.4}$$

En esta ecuación se puede observar que está siendo tomada la tensión superficial del líquido en la transferencia de calor y se espera que disminuya la transferencia de calor al aumentar la tensión superficial.

Zubber (1959) consideró que existe un momento de competitividad de espacios al momento que las burbujas ascienden, el líquido que se encuentra adyacente a las burbujas toma el lugar de estas en la frontera con el sólido. Esta competitividad aumenta cuando se incrementa la cantidad de calor en el sólido. (Kandlikar, 2001).

Chang (1961), postula que el vapor deja la superficie caliente hasta que la velocidad crítica es alcanzada y el vapor regresa a la superficie caliente al mismo tiempo de alcanzar la velocidad crítica. También desarrolló una ecuación (Ec. 3.3.5)

$$q''_c = 0.098 \rho_g^{1/2} h_{lg} [\sigma g (\rho_l - \rho_g)]^{1/4} \quad \text{Ec. 3.3.5}$$

En 1961 Kirishenko y Cherniakov desarrollaron una ecuación que correlaciona al ángulo de contacto con la transferencia de calor. (Ec. 3.3.6)

$$q''_c = 0.171 h_{fg} \sqrt{\rho_g} [\sigma g (\rho_l - \rho_g)]^{1/4} \frac{(1 + 0.324 * 10^{-3} \beta^2)^{1/4}}{\sqrt{0.018 \beta}} \quad \text{Ec. 3.3.6}$$

Esta correlación no funciona correctamente debido a que da valores de transferencia de calor elevados. Lo importante de esta ecuación es que menciona que al aumentar el ángulo de contacto ( $\beta$ ) disminuye la transferencia de calor.

También se ha estudiado la influencia de la diferencia de concentraciones (mezclas) en la transferencia de calor. Por ejemplo, Mc Gillis – Carey estudiaron la influencia del efecto Marangoni en el flux de calor crítico y en sus resultados obtuvieron que el efecto Marangoni es el causante de las diferencias en el flux de calor crítico. La ecuación 3.3.7 ejemplifica su propuesta (Vidal, 1999).

$$q''_{m,MC} = q''_{m,zuber} \left[ 1 + \frac{4}{3\pi^2} \frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x} (x_i - x_c) \right]^{1/4} \quad \text{Ec. 3.3.7}$$

#### 3.4 Tensión superficial

Se define como la energía requerida para aumentar el área superficial de un líquido en una unidad de área. Las fuerzas internas de las moléculas hacen que la superficie disminuya en lo más posible el área de la superficie. Esto se debe a que las moléculas que se encuentran en el seno del líquido se encuentran con un balance de fuerzas igual a cero, es decir; las moléculas ejercen las mismas fuerzas hacia todos los sentidos. En cambio, en la superficie del líquido las moléculas de la superficie solo son atraídas por las moléculas que se encuentran en el seno del líquido. Fig. 3.4.1

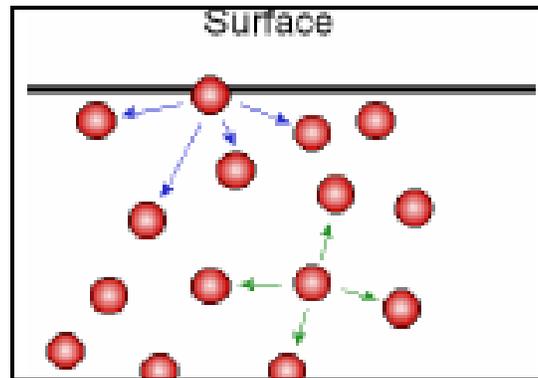


Figura 3.4.1. Muestra las atracciones dentro y fuera del líquido

Existen fuerzas intermoleculares que ocasionan que las moléculas se atraigan y se expulsen ocasionando las fuerzas de adhesión y cohesión. Las fuerzas intermoleculares más importantes son las llamadas fuerzas de Van der Waals (i.e el ion dipolo) que se producen cuando los polos negativos y positivos se alinean para poder atraerse.

Por otro lado, la cohesión se define como la capacidad que tienen las moléculas de la misma especie para mantenerse unidas debido a las fuerzas intermoleculares. Así mismo la adhesión se define como la capacidad que tienen las moléculas de diferente fase para unirse, por ejemplo, se observa adhesión en el ascenso capilar.

Dupré definió el trabajo de adhesión al decir que “la energía necesaria para separar dos líquidos que están unidos por la interfase, es la misma que se necesita para mantenerlos unidos por atracción” (Kensington, 1968). En la siguiente ecuación 3.4.1 se relaciona el trabajo de adhesión con las tensiones interfaciales, se le conoce como la relación de Dupré.

$$W_{sl} = \gamma_{lv} + \gamma_{sv} - \gamma_{sl} \quad \text{Ec. 3.4.1}$$

#### 3.5 Medición de la tensión superficial por capilaridad

Durante años se ha estudiado la capilaridad para entender y caracterizar las superficies de líquidos y sólidos por medio del estado de tensión. El efecto de capilaridad se da al introducir, a un líquido, un tubo que en el interior contiene un tubo más pequeño del ancho de un cabello (capilar del *latin capillus*). Observándose que el fluido asciende por el capilar.

La medición de la tensión superficial se realiza por medio de métodos estáticos o dinámicos. El primer método depende de la diferencia de presiones en los dos lados de la superficie curvada que es formada por la tensión superficial. Existen varios mecanismos para determinar la presión hidrostática dentro de la curvatura de la superficie por ejemplo; el ascenso capilar con sus muchas variantes, método “presión de burbuja”, el método de la “gota colgante” y el de “gota adyacente” (Kensington, 1968).

Existen otros métodos que dependen de la formación momentánea de una película de líquido adherida a un sólido. Los métodos utilizados son; el método del anillo Du Nouy y el método del plato que es mojado momentáneamente por líquido. Estos métodos son muy sencillos y son más utilizados debido a su fácil elaboración.

Los métodos dinámicos no son muy empleados debido a que depende de ciertas vibraciones del líquido para extender o contraer la superficie y de esta forma poder medir la tensión superficial. En estos tipos de métodos es necesario realizar varias repeticiones debido a que la medición de la tensión superficial depende de los periodos de vibración (Kensington, 1968).

La medición de la tensión superficial por capilaridad se desarrolla al introducir un capilar en un líquido, este mojará las paredes del tubo capilar (hidrofílico). Esto es ocasionado por las fuerzas intermoleculares de adhesión entre el líquido y un sólido son más fuertes que las fuerzas intermoleculares de cohesión del líquido.

### III. Revisión bibliográfica

---

En un tubo capilar, la tensión superficial ocasiona que el líquido ascienda hasta que existe el peso de líquido suficiente para que las fuerzas gravitacionales superen a las fuerzas intermoleculares.

La teoría que relaciona la tensión superficial con la capilaridad es que la curvatura del menisco que se forma al elevarse el líquido por el capilar determina la presión que se encuentra justo por debajo del menisco. En la ecuación 3.5.1 se relaciona la curvatura del menisco, la tensión superficial y la diferencia de presiones en la superficie. (Kensington, 1968)

$$p_1 - p_2 = \gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{Ec. 3.5.1}$$

Para realizar esta ecuación se tomó una parte muy pequeña de la superficie, en donde se formaran ángulos rectos. El elemento  $p_1$  es la presión en el lado cóncavo y  $p_2$  es la presión en lado convexo,  $R_1$  es el radio formado por la parte más grande de la porción tomada de la superficie, mientras que  $R_2$  es el radio formado por la parte más pequeña.

Young fue uno de los primeros científicos que logró desarrollar una ecuación para poder explicar que el ascenso capilar está dado por el balance de fuerzas entre la presión 3.5.2 es la que define a la tensión superficial como un balance de presiones.

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \quad \text{Ec. 3.5.2}$$

Donde  $\Delta P$  corresponde a la diferencia de presiones,  $\gamma$  es la tensión superficial y  $r$  es el radio del capilar.

### III. Revisión bibliográfica

---

La ecuación de Young Laplace se iguala a la presión de la columna de agua para poder obtener la ecuación (3.5.3) de esta manera se tiene una ecuación en términos que se pueden medir en el laboratorio y algunos se encuentran reportados en la bibliografía, como es el caso de la densidad, la gravedad y la altura tomada por el capilar.

$$\Delta P = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} = \rho gh \quad \text{Ec. 3.5.3}$$

De la ecuación 3.5.3 se despeja la tensión superficial para obtener la ecuación 3.5.4 que se utilizara para medir la tensión superficial.

$$\gamma = \frac{\rho rgh}{2} \quad \text{Ec. 3.5.4}$$

Se puede observar que el termino  $\cos \theta$  no se encuentra, esto es debido a que se hace la suposición de que la interfaz aire – líquido en una superficie de vidrio. ( $\cos \theta = 1$ ,  $\theta=0$ ) (Perry, 1974).

En esta tesis se desarrolla la metodología para obtener los radios de tres diferentes capilares, por esa razón es necesario despejar el radio de la ecuación anterior, ver ecuación 3.5.5. (Campaña, R)

$$r = \frac{2\gamma}{\rho gh} \quad \text{Ec. 3.5.5}$$

En la siguiente figura (3.5.1) se ejemplifica la forma en que se mide la altura del capilar. Esta es la parte fundamental de la medición de la tensión superficial debido a que se debe

de hacer con toda precisión, pues una mala medición ocasionaría datos totalmente incorrectos. Se mide la altura desde la base del menisco inferior en la superficie del líquido hasta la base del menisco que se forma dentro del capilar. (Adam, 1968)

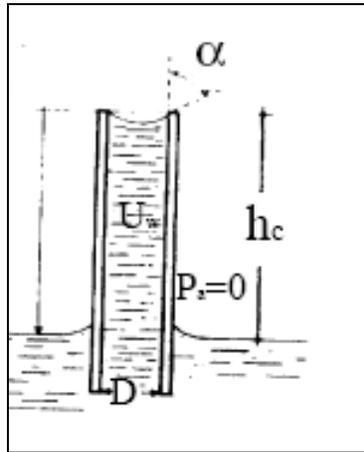


Figura 3.5.1. Altura de meniscos. (Obtenido de mecánica de los suelos)

### 3.6 Ángulo de contacto

El ángulo de contacto es el que se forma al colocar un líquido sobre una superficie sólida formando una gota, esto es debido a las fuerzas intermoleculares como son la adhesión y las fuerzas ion dipolo. Uno de los primeros investigadores que se interesó en este tema fue Laplace quien explica la adhesión entre el líquido y un sólido en términos de campos de fuerza. (Fowkes, 1964)

Thomas Young propuso tratar el ángulo de contacto en un líquido como resultado del equilibrio mecánico que se forma al dejar una gota sobre la superficie sólida bajo la acción de tres tensiones superficiales,  $\gamma$  líquido-sólido,  $\gamma$  sólido-vapor y  $\gamma$  líquido- vapor.

La ecuación propuesta por Young (Ec.3.6.1) es bastante compleja por los factores de tensión superficial del sólido con el líquido y sólido con el vapor, pues estos no se pueden

### III. Revisión bibliográfica

medir con facilidad ni con precisión. (Zisman, 1964). En la siguiente figura 3.6.1 se muestra la imagen donde se representa las tensiones superficiales con el ángulo de contacto.

$$\gamma_{sg} = \gamma_{ls} + \gamma_{lg} \cos \theta \quad \text{Ec. 3.61}$$

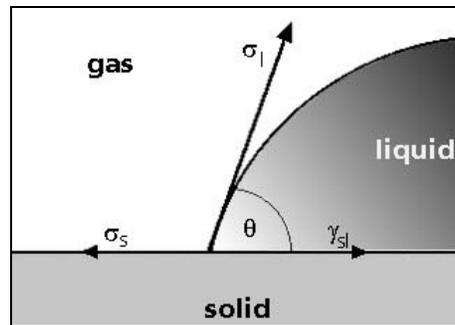


Figura 3.6.1. Relación de tensiones superficiales en el ángulo de contacto

Es importante mencionar que un líquido no mojará la superficie horizontal cuando el ángulo de contacto que se forme se diferente a cero. En cambio mojará totalmente la superficie cuando se forme un ángulo igual a cero. (Fowkes, 1964)

Se puede observar que existe una total mojabilidad ( $\theta=0$ ) de la superficie cuando la diferencia de las tensiones entre la  $\gamma_{sv}$  y  $\gamma_{sl}$  es mayor a la tensión creada entre el sólido y líquido. En cambio cuando existe un ángulo de  $90^\circ$  se puede observar que las tensiones superficiales formadas por sólido-vapor y sólido-líquido son iguales, por lo tanto se dice que el líquido moja parcialmente.

Puede existir el caso de no mojabilidad, esta es ocasionada cuando la diferencia de las tensiones entre la  $\gamma_{sv}$  y  $\gamma_{sl}$  es menor en comparación por la tensión superficial líquido-vapor. En la siguiente figura 3.6.1 y 3.6.2 se muestran los diferentes ángulos.

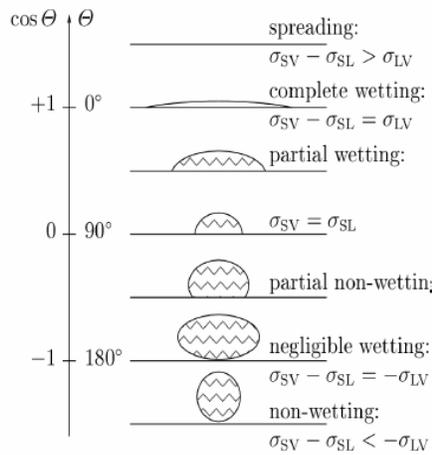


Figura 3.6.1. Esquematiza los ángulos posibles

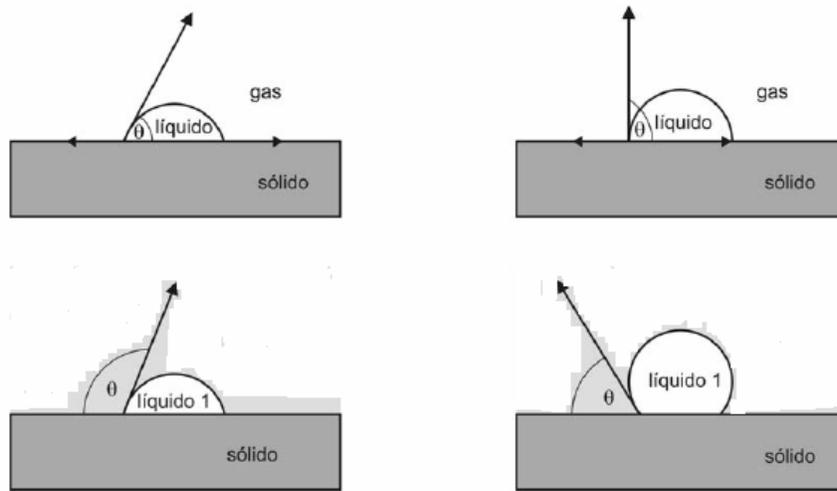


Figura 3.6.2. Formación de ángulos posibles.

Zisman (1964) menciona que existen otros factores que afectan la mojabilidad de la gota por ejemplo; la viscosidad del líquido, la rugosidad de la superficie y la limpieza del sólido. También menciona que el lustrado de la superficie sólida incrementaría el poder de

### III. Revisión bibliográfica

---

reflexión de la superficie, esto ayudaría a obtener mejores resultados en la medición. (Adam,1968)

El lustrado de la superficie sólida debe de hacerse con un material de tela que no sea abrasivo para la superficie ya que dañaría la superficie con rasguños y orificios si se hiciera con un material diferente. Rayleigh propuso que este procedimiento sea por pulido a nivel molecular.

Al dejar la superficie sólida expuesto en el aire durante un cierto tiempo se depositaría una pequeña capa de grasa, lo cual modificaría totalmente la propiedades de la superficie del sólido. Es necesario realizar una limpieza de la superficie con una tela que no dañe la superficie y evitar que se deje expuesta al aire (Adam,1968).