# ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

## FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

# DESCARGAS ELECTRICAS EN NITROGENO PARA EL TRATAMIENTO SUPERFICIAL DE METALES

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO ELECTRICO EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

PEDRO ARTURO JARRIN COELLO

QUITO, MAYO 1997

Certifico que la presente tesis de grado ha sido realizada en su totalidad por el Sr. Pedro Arturo Jarrín Coello.

Ing. Paúl Ayora G.

**DEDICATORIA**

A mis padres con quienes pude contar en todo momento. A su cariño e integridad .

A mis hermanos y hermanas, por todo el apoyo y la ayuda que me brindaron.

A quienes creyeron en mi...

...y también a quienes no lo hicieron.

## AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento a todas aquellas personas, que con su ayuda, hicieron posible la culminación de esta tesis:

Instituto de Investigaciones Tecnológicas (E.P.N.)

Metalurgia Extractiva (E.P.N.)

Laboratorio de Termodinámica (F.I.Q. - E.P.N.)

Laboratorio de Metalografía (F.I.M.- E.P.N.)

Laboratorio de Metalurgia (E.S.P.E.)

Sr. José Galeas (Taller Eléctrico - F.I.E.-E.P.N.)

Al Dr. Celso Moya, y los Ingenieros Trajano Ramírez y Patricio Estupiñán por su colaboración y oportunos consejos.

Al Ing. Paúl Ayora por su brillante labor en la dirección de este trabajo.

La cosa mas bella que podemos experimentar es la sensación del misterio.

Es esa la emoción fundamental, aquella en que reside el origen de todo arte verdadero, de toda verdadera ciencia.

Albert Einstein

# INTRODUCCION

Desde la antiguedad el hombre ha tenido la necesidad de recurrir a la combinación de diversos metales con el fin de obtener en los mismos características de dureza, resistencia a la corrosión, al desgaste o al ataque de ciertos agentes químicos. También se recurrió al empleo de distintos procesos térmicos con el mismo propósito.

En la industria el proceso de endurecimiento de piezas terminadas de hierro o acero en especial de tipo superficial es una práctica común y que va en aumento.

Con esto se puede incrementar la vida útil de piezas de equipo y maquinaria que de otra forma se convertirían en desechos en menor tiempo.

En aquellas piezas metálicas que por un lado deben soportar la fricción y el desgaste producido por el contacto con otras piezas, y por otro lado resistir los esfuerzos a los que se ven sometidos, se prefiern los tratamientos de endurecimiento superficial ya que de esta forma el exterior del metal soporta la fricción con mayor eficacia, en tanto que la matriz o material base es capaz de responden mejor a las tensiones mecánicas (como torsión, compresión, etc) a las que la pieza se ve expuesto.

Este trabajo propone una variación a la nitruración, nombre con el cual se conoce a la tecnología de endurecimiento superficial en la cual se ingresa nitrógeno en la superficie del metal para lograr el endurecimiento de su superficie.

Esta propuesta de nitruración de tipo iónico, en la cual no interviene el control de la temperatura, se justifica en función de conseguir mantener inalterables las dimensiones de las piezas tratadas, ya que este efecto que se produce en la nitruración tradicional, es indeseable cuando se trata se piezas de precisión los que se desean tratar.

Para estudiar el comportamiento de las partículas en la descarga luminiscente se hace necesaria la construcción de un equipo con el cual se observa el fenómeno de la descarga luminiscente y permita variar ciertas características para tener un mejor conocimiento del fenómeno de nitruración iónica.

Se abordan conceptos fundamentales que tienen que ver con el comportamiento de las partículas en su desplazamiento cerca del material y al interior del mismo; también la forma de controlar su energía, en un medio gaseoso en el cual se produce una descarga luminiscente, con el fin de impactar contra el metal y conseguir su ingreso dentro del metal que se desea tratar.

## OBJETIVO

El objetivo de esta tesis es el de analizar varias condiciones de la descarga eléctrica luminiscente, en un recipiente transparente lleno de nitrógeno, con el propósito de producir la nitruración de metales.

Se realizará un estudio teórico sobre la estructura atómica, descargas en gases y nitruración en gas, sus características y variables.

Se construirá un cilindro de acrílico transparente que permitirá visualizar el proceso de la descarga luminiscente y con ello controlar la realización del fenómeno de la nitruración.

La descarga luminiscente, mediante el control de la presión, el voltaje y la corriente, servirá para estudiar el tratamiento a los metales.

## ALCANCE

El desarrollo de la tesis permitirá contar con el equipo adecuado para un estudio inicial de la descarga luminiscente en una atmósfera saturada de nitrógeno molecular.

Una vez controlada la descarga se procederá a trabajar con variaciones de la distancia entre los electrodos, los cuales tendrán una forma determinada y serán intercambiados, con ello se determinará la dependencia del fenómeno en la forma de los mismos.

Finalmente se verificará el grado de nitruración mediante pruebas de resistencia de los materiales analizados.

# CAPITULO 1

# INTRODUCCION

## 1.1 GENERALIDADES

Actualmente existe un conocimiento claro acerca de los fenómenos de interacción entre las distintas partículas que interactúan ente sí en una descarga eléctrica producida en un medio gaseoso.

Ya que la nitruracion iónica es un fenómeno de interacción entre las partículas de un gas y aquellas que forman parte del material que se va a tratar, se debe estudiar su comportamiento para tener el conocimiento de las leyes que rigen su desplazamiento hacia la superficie del metal y dentro de él.

Se debe prestar especial atención al mecanismo de ionización del gas debido a que su ingreso en el metal se produce en forma atómica y éste se presenta en forma molecular.

Estudiar la formación de las diversas regiones en un descarga luminiscente, en especial aquellas que se producen cerca del cátodo, dará un mayor conocimiento del comportamiento de las partículas, que debido a la presencia del campo eléctrico, interactúan con el metal que forma el cátodo.

Las condiciones de voltaje y presión en las que se produce la descarga luminiscente permitirá identificar las condiciones más favorables para la realización de proceso de nitruración iónica.

## 1.2 ESTRUCTURA ATOMICA

### 1.2.1 NATURALEZA FOTONICA O CUANTICA DE LA LUZ

Cuando a un electrón que pertenece a un átomo y que se halla en un determinado nivel energético, se le transfiere energía, éste abandona momentáneamente su nivel; cuando esto ocurre se dice que el electrón esta "excitado".

La duración media del estado de excitación va de 10E-7 a 10E-10 segundos; después de este lapso de tiempo el electrón vuelve a su estado primitivo.[1]

En esta transición el átomo pierde una cantidad de energía igual a la diferencia entre las energías que sucesivamente ha ocupado, energía que se manifiesta en forma de radiación. Según Bohr, esta energía se emite en forma de un " fotón " de luz.

El término **fotón** expresa una cantidad de energía radiante igual a **h** (constante de Planck)[2] multiplicado por la frecuencia **f** a la cual se emite esta radiación en forma de luz.

La emisión de luz es discontinua ya que ésta solamente es emitida cuando el electrón se desplaza de niveles de energía altos a niveles energéticos bajos.

Al efectuar esta transición, emite una cantidad definida de energía de frecuencia determinada, es decir, emite un fotón $h \cdot f$ de luz.

---

[1] MILLMAN,J.; SEELY, S.; Electrónica; p **258**.

[2] h = 6.626176E-34 J / Hz . FINK,Donald; Manual de ingeniería eléctrica; McGraw Hill, 13 edición, Tomo I p **28**; Mexico;1996.

Por ello al observar a simple vista el fenómeno de una descarga luminosa, ésta aparece como un proceso continuo, debido a la gran cantidad de electrones que, al entregar su energía para llegar a su nivel original, emiten una gran cantidad de fotones por unidad de tiempo.

### 1.2.2 BANDAS DE ENERGIA

Los electrones, en número determinado, rodean al núcleo del átomo, forman parte de niveles de energía en los cuales se disponen en cantidades determinadas.

Cada electrón es atraído al núcleo según la ley de Coulomb, es decir, con una fuerza que es inversamente proporcional al cuadrado del radio de su trayectoria.

Considerando un metal que tiene una estructura de bandas como la mostrada en la figura 1.1 que corresponde al sodio (Z = 11). Las bandas correspondientes a los niveles atómicos 1s, 2s, 2p están llenas ya que sus respectivas capas atómicas están llenas, pero la banda 3s esta medio llena ya que solo tiene un electrón .

Bajo un campo eléctrico exterior, los electrones de la banda 3s pueden adquirir cantidades adicionales de energía y pasar a los muchos estados varios dentro de la banda.

Los electrones excitados por el campo eléctrico ganan movimiento en la dirección opuesta al campo, originando un movimiento colectivo a través del cristal, constituyendo con ello una corriente eléctrica.

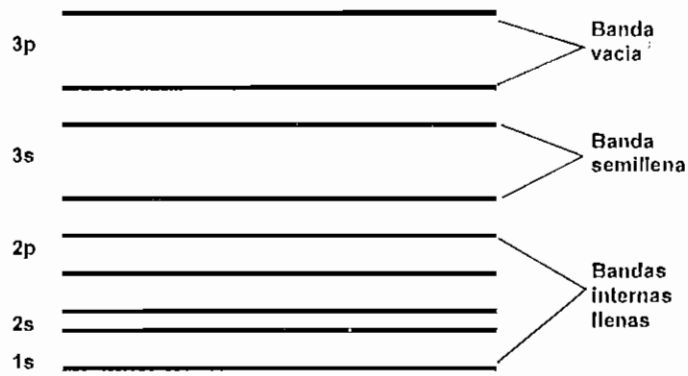



**Fig 1.1.** Bandas de Energía en un conductor[3]

Por lo tauto los elementos químicos con una estructura de bandas similar a las mostrada en la figura, son buenos conductores de electricidad (y buenos conductores térmicos) y los electrones de la banda mas alta parcialmente ocupada son los responsables de esto. A esta banda se la llama de **conducción**.

Los materiales **aislantes**, en cambio, son aquellos que tienen todos los niveles llenos en la mas alta banda de energía y existe una brecha considerable entre los niveles energéticos permitidos donde se alojan los electrones. Por ello los campos eléctricos generalmente, no son capaces de elevar electrones a la banda mas elevada para producir conducción.

Otros materiales tienen un pequeño espacio entre la banda de energía llena y la siguiente banda mas elevada vacía. A altas temperaturas o con ciertas impurezas presentes,

[3] ALONSO, M.; FINN, E.; Física; Vol. III: p 271 Fig 6-34.

algunos electrones pueden elevar su energía permitiendo una conducción moderada. Estos elementos se denominan **semiconductores.**

Cuando un electrón es desplazado desde la banda de valencia a la banda de conducción, deja un hueco en la banda de valencia, como se puede ver en la figura 1-2.

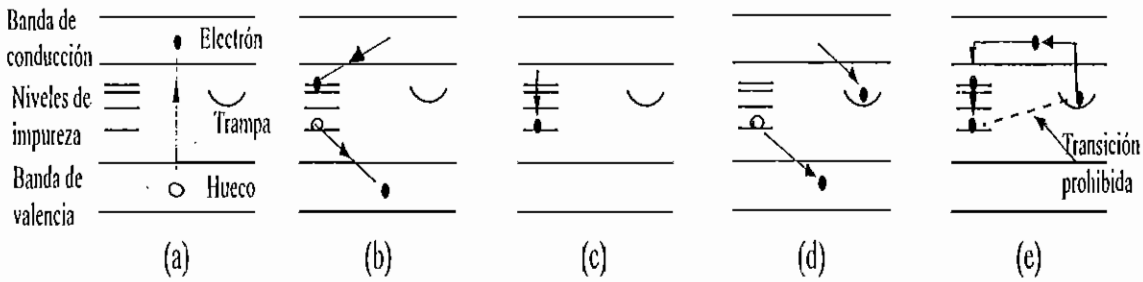



**Fig 1-2** Mecanismo de la luminiscencia[4]

En un material que presente una estructura regular y sin impurezas, el electrón usualmente regresa a la banda de valencia.

Si la red tiene alguna impureza que introduzca niveles de energía en la región prohibida, un electrón que ocupe un nivel de impureza bajo, puede llenar el hueco en la banda de valencia, mientras tanto, el electrón en la banda de conducción se desplaza al nivel de impureza mas alto. Generalmente estas transiciones involucran fotones de poca energía los cuales no llegan a ser visibles.

[4] ALONSO, M.; FINN, E.; Física; Vol. III: p 286 Fig 6-50.

Finalmente el electrón puede pasar de un nivel de impurezas de alta energía a una libre de baja energía, emitiendo una radiación de menor energía que la energía incidente, esto constituye la luminiscencia.

### 1.2.3 FUNCION DE TRABAJO

A una temperatura de 0° K resulta imposible que un electrón pueda evadirse de un metal, ya que requeriría una energía dada $E_B$, y la energía máxima que posee un electrón es $E_M$. Por ello se debe suministrar una energía que sea igual a la diferencia entre $E_M$ y $E_B$ para poder extraer el electrón del metal.

Esta diferencia, que se la suele designar por $E_W$, se conoce como energía o trabajo de extracción, o función de trabajo ( "Work function" ) del metal.

" La función de trabajo es el valor de la energía que suele ser suministrada a un electrón al cero absoluto para vencer las fuerzas de la superficie y causar emisión ".[5]

Un electrón inducirá una carga positiva en el material del cual se evade, debido a esto se producirá una fuerza de atracción entre la carga positiva inducida y el electrón, produciendo que el electrón regrese al metal salvo que tenga una energía suficiente para salir del espacio de influencia del metal.

[5] RYDER,D.; Electronic fundamentals and applications; Third edition; Prentice Hall Inc.; USA; p 93; 1964.

La ecuación que determina la fuerza electrostática que actúa sobre el electrón -e (Coulomb), a una distancia x (metros) de un conductor metálico plano, viene dado por la atracción entre el electrón y su carga imagen, ubicada en el interior del conductor a una distancia x de la superficie es:[6]

$$f = \frac{(+e)(-e)}{4\pi\,\varepsilon o(2x)^2} = \frac{-e^2}{16\,\pi\varepsilon o x^2}\ [N] \qquad (1.1)$$

Donde εo es la permeabilidad del espacio libre. El signo menos indica que la fuerza es de atracción hacia la superficie del metal.

Dentro de los límites en los cuales el electrón reacciona con el metal como si fuese una superficie plana, la fuerza varía según la ecuación (1.1); sin embargo si la distancia entre el electrón y el metal disminuye, la superficie ya no puede considerarse plana y esta ecuación ya no es aplicable.

Por ello ocurre que cuando el electrón alcanza la superficie del metal, la fuerza va modificándose desde de la fuerza de atracción dada por la ecuación (1.1) hasta cero. Esto se debe a que el metal es una región equipotencial y la fuerza media sobre un electrón en el interior del metal es cero.

La función que describe esta fuerza esta representada por la figura 1-3.

La función de la energía potencial que origina esta fuerza f esta dada por:[7]

[6] MILLMAN,J.; SEELY, S.; Eleetrónica; p 111;1966.
[7] MILLMAN,J.; SEELY, S.; Electrónica; p 112;1966.

$$U = -\int_0^x f(x)\,dx \qquad [\text{Joule}] \qquad (1.2)$$

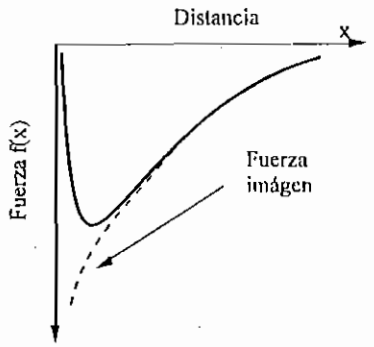



**Fig 1-3.** Fuerza en un electrón al evadirse de un metal[8]

La fórmula (1.2) expresa el trabajo que se debe emplear para sacar un electrón de la superficie del metal hasta llevarlo a una distancia **x** del mismo.

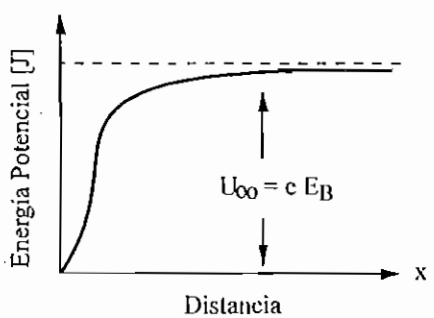



**Fig 1-4.** Curva de la energía potencial correspondiente a la curva de la fuerza de la Fig. 1-3.[9]

[8] MILLMAN,J.; SEELY, S.; Electrónica; p 112.Fig 4-12;1966.
[9] MILLMAN,J.; SEELY, S.; Electrónica; p 112.Fig 4-13;1966

El área total abarcada por la figura 1-4 representa la cantidad total de trabajo necesario para sacar un electrón del metal, la cual es igual a la altura de la barrera de potencial, así:[10]

$$U_{\infty} = eE_B = -\int_0^x f(x)\,dx \qquad \text{[Joule]} \qquad (1.3)$$

Donde:

**f(x)** fuerza de atracción sobre el electrón

$\mathbf{E_B}$ Valor de la barrera de energía potencial.

$\mathbf{U_\infty}$ Trabajo necesario para arrancar un electrón del metal.

**x** distancia del electrón con respecto al metal.

La posición de la superficie de metal se toma a la distancia a la cual la curva de la fuerza, extrapolada, tiende a menos infinito.

### 1.2.4 IONIZACION

Si al electrón que mas fácilmente se le puede separar del átomo se le entrega cada vez mas energía, éste se desplazará, ubicándose en estados estacionarios, a posiciones cada vez mas alejadas del núcleo.

Si la energía del electrón llega a ser lo suficientemente grande como para salir del campo de influencia del átomo (ahora convertido en ion positivo), entonces el electrón quedará separado del mismo.

[10] iden a referencia 8.

La energía requerida para lograr esto se denomina **Potencial de Ionización.**

¨ Numerosos investigadores han obtenido valores para la primera ionización del nitrógeno molecular, mediante impacto con electrones, centrados alrededor de 15.6 eV en buena concordancia con el valor obtenido mediante electroscopía de 15.576 eV ¨.[11]

Esta energía requerida para causar ionización a un átomo puede ser entregada mediante el impacto de un electrón o un ion positivo contra el átomo; también mediante la captación de un fotón de energía radiante, o el gas puede llegar a ser tan caliente como para ionizar los átomos térmicamente por la colisión con átomos neutrales.

Los procesos de ionización que vamos a detallar son los tres primeros mencionados, por ser de nuestra interés en este estudio.

### 1.2.4.1 COLISIONES DE LOS ELECTRONES CON LOS ATOMOS.

El método mas importante para conseguir intercambio energético en una descarga gaseosa es mediante el impacto de un electrón contra un átomo.

Si en un tubo de descargas eléctricas se produce un campo eléctrico, de tal forma que un electrón sea acelerado dentro del mismo, éste chocará contra un átomo que se cruce en su trayectoria. logrando uno de los siguientes efectos:

[11] FIELD,F.H.; FRANKLIN, J.L.; Electron impact phenomena; p 62.

Si el electrón tiene escasa energía tendrá un choque " elástico " contra el átomo; la dirección que tenía el electrón se alterará pero su energía no habrá variado ya que la masa del electrón es muy pequeña en comparación con la del átomo o la molécula gaseosa.

Por otra parte, si el electrón ha adquirido una energía suficiente de tal forma que al chocar contra el átomo le transferirá esta energía para que uno de sus electrones alcance un nivel cuántico mayor.

Cuando el electrón incidente tenga una energía superior a la descrita, y que alcance una magnitud igual a mayor al potencial de ionización del gas, entonces un electrón del átomo, de su capa exterior, será separado completamente del mismo.

El exceso de energía adquirido por el electrón incidente se convertirá en energía cinética repartida entre los dos electrones ( incidente y del átomo ionizado) ya que la energía que adquiere el ion positivo es muy pequeña debido a que su masa es muy grande en comparación con la de los electrones.

### 1.2.4.2 COLISIONES DE LOS FOTONES CON LOS ATOMOS.

Otra forma de conseguir que un átomo alcance un estado de excitación es sometiendo el gas a una radiación luminosa de una frecuencia determinada.

Esta posibilidad se manifiesta en la regla de transición de Bohr, la cual manifiesta: ¨ Un átomo puede absorber un fotón de frecuencia f y por lo tanto, elevarse del nivel de energía W1 al nivel superior W2, en el que W2 = W1 + h . f [Joule]¨.[12]

La forma de conseguir esto es mediante la incidencia de una radiación luminosa que abarque todas las frecuencias, es decir una radiación de espectro continuo.

Cuando un fotón es captado por un átomo, al átomo excitado puede volver a un estado ¨ normal ¨ en una sola etapa, o puede hacerlo en mas de una. Si el átomo desciende de uno o mas niveles, antes de llegar al estado normal, emitirá varios fotones, los cuales corresponderán a las diferencias entre las energías de los sucesivos niveles que el átomo ha ocupado en su descenso energético.

Una característica importante de la excitación por absorción de fotones es la de que un fotón no produce ionización a menos que su energía corresponda exactamente a la diferencia entre dos niveles estacionarios del átomo con el cual colisiona. Debido a esto la probabilidad que se presente este proceso es escasa, a menos que la energía del fotón corresponda exactamente a la diferencia de energías entre dos estados estacionarios de los átomos del gas.

Si este proceso se verifica entonces el fotón desaparece y en consecuencia se forman un electrón y un ion positivo.

[12] MILLMAN,J.; SEELY, S.; Electrónica; p 263; 1966.

" Se ha comprobado experimentalmente que la probabilidad que se produzca la ionización por fotones se presenta cuando la energía del fotón es igual al potencial de ionización, disminuyendo rápidamente dicha probabilidad cuando la energía del fotón es más elevada "[13].

Una diferencia importante entre la ionización por fotones y la ionización por choque de electrones es que como la energía del fotón es más alta que la requerida para ionizar al átomo, entonces la probabilidad de ionización por fotones disminuye.

" Esta aceptado que el proporción de fotoionización en las descargas gaseosas es mucho menor que aquella ionización por colisión de electrones "[14].

### 1.2.4.3 COLISIONES DE LOS IONES POSITIVOS CON LOS ATOMOS

Se podría pensar que las colisiones entre iones positivos y átomos neutros de un gas originase cierta excitación e ionización. En realidad, sin embargo, la probabilidad de ionización debido a estas colisiones es mucho mas reducida que en el caso de las colisiones con electrones.

Los iones positivos son agentes efectivos de ionización solo si sus energías son muy grandes.

[13] MILLMAN,J.; SEELY, S.; Electrónica; p 265, 1966.
[14] COBINE, J.; Gaseous Conductors; p 87;1958.

" Aparentemente los iones empiezan a ser efectivos ionizadores cuando han caído a través del potencial de ionización mínimo. En este caso la energía cinética de los iones es del orden de los cientos de voltios, y comienzan a ser ionizadores mas efectivos que los electrones " [15].

Por lo tanto, a menos que un ion adquiera suficiente energía entre colisiones con los átomos, no es apto para provocar ionización.

### 1.2.4.4 IONIZACION MULTIPLE

Una vez que se ha conseguido ionizar al átomo, es posible conseguir posteriores ionizaciones si se le entrega más y más energía al átomo ionizado.

Bleakney ha detectado hasta cinco grados de ionización en el vapor de mercurio[16].

La cantidad de energía necesaria para liberar un electrón de un ion depende de la cantidad de electrones que ya han sido liberados y de la configuración electrónica del ion. Por ello cada nueva ionización requiere más energía que la anterior.

En un dispositivo de descarga no es posible que se produzca ionización múltiple a menos que las condiciones físicas estén ajustadas adecuadamente.

[15] COBINE, J.; Gaseous Conductors; p 84;1958.
[16] BLEAKNEY,W.; Physical Review; p 34,157,1929.

## 1.2.5 DESIONIZACION Y RECOMBINACION

Si se remueven las fuentes de ionización de un gas ionizado éste rápidamente asume un estado neutral debido a la difusión iónica hacia las paredes y por la recombinación de los iones positivos y negativos.

La recombinación volumétrica usualmente consiste en el enlazamiento de los electrones por si mismo a átomos neutrales para formar iones negativos (paso 1 figura 1-4), los cuales entonces se recombinan con iones positivos (paso 2, fig 1-4).

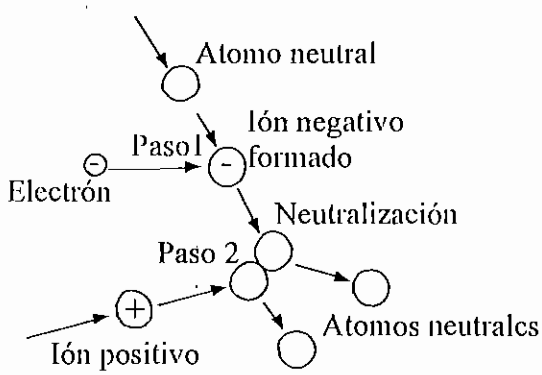



**Fig 1-5** Proceso de desionización volumétrica[17]

Cuando un gas es desionizado por difusión, los iones negativos o electrones, y los iones positivos se mueven hasta las paredes bajo la influencia de los gradientes de concentración, y allí el ion positivo es neutralizado y esta partícula resultante se aleja como un átomo neutral.

[17] COBINE, J.; Gaseous Conductors; p 95 fig 4.9;1958.

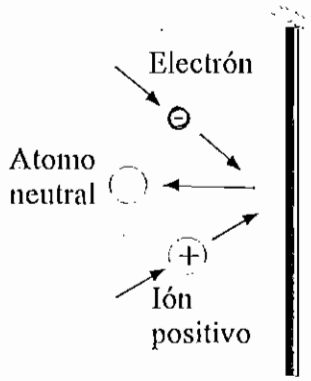



**Fig 1-6** Desionización en las paredes del recipiente[18]

En un proceso de recombinación se desprende una cantidad de energía igual al potencial de ionización[19].

Por tanto la molécula neutra resultante, de acuerdo al principio de conservación de la energía, poseerá una energía igual a la suma de las energías del electrón, del ion, y del potencial de ionización. También la cantidad de movimiento, que debe permanecer constante, será igual a la suma de las cantidades de movimiento del electrón y del ion.

Consideremos un volumen gaseoso en el cual iones positivos y negativos están uniformemente distribuidos y los agentes de ionización han desaparecido. Se asumirá que el volumen es tan grande que la desionización es enteramente por recombinación volumétrica.

Llamemos $\alpha i$ al coeficiente de recombinación de iones positivos y negativos, $\eta 1$ la concentración de iones positivos y $\eta 2$ la concentración de iones negativos, entonces[20]:

[18] COBINE, J.; Gaseous Conductors; p 96 fig 4.10;1958.
[19] MILLMAN,J.; SEELY, S.; Electrónica; p 268, 1966.

$$\frac{d\eta 1}{dt} = \frac{d\eta 2}{dt} = -\alpha i.\, \eta 1.\, \eta 2 \qquad [1.4]$$

Si las concentraciones de los iones positivos y negativos son iguales:

$$\frac{d\eta}{dt} = -\alpha i.\eta^2 \qquad [1.5]$$

Integrando esta expresión tenemos:

$$\eta = \frac{\eta o}{1+ \alpha i.\eta o.t} \qquad [1.6]$$

donde $\eta o$ es la concentración de iones en el instante que la fuente de ionización es removida.

Además es fácil apreciar que la cantidad inicial de iones $\eta o$ por $cm^3$ disminuye en el transcurso del tiempo.

En condiciones normales, la ionización se renueva permanentemente[21].

## 1.3 DESCARGAS LUMINISCENTE EN NITROGENO MOLECULAR

### 1.3.1 CONDUCCION ELECTRICA EN UN GAS

Generalmente los gases se encuentran siempre en un estado de ionización parcial por la acción de los rayos cósmicos, ultravioleta y visibles y por la radioactividad.

---

[20] COBINE, J.; Gaseous Conductors; p 98 ;1958.
[21] ROTH, A; Técnica de las alta tension; p 242; 1966.

En promedio en el aire atmosférico se puede hallar unos 1000 iones por centímetro cúbico[22].

Esta fuente de partículas cargadas puede contribuir a la producción de un pequeño flujo de corriente cuando en el seno de un gas se aplica un voltaje bajo.

Para evaluar el comportamiento eléctrico de cada gas se usa un tubo sellado provisto de dos electrodos fríos, planos y paralelos, separados una distancia y entre los cuales se encuentra el gas que se va a estudiar.

Entre ambos electrodos se aplica un voltaje regulable, en serie con una resistencia limitadora para el control de la corriente y se determina la intensidad que atraviesa el tubo en función de la tensión entre los electrodos; esto se consigue variando la resistencia intercalada o el voltaje aplicado.

Al principio la corriente aumentará linealmente con el aumento de tensión aplicada, produciendo una característica I/V óhmica. Al aumentar el voltaje se llega a una región de saturación en la cual los portadores de carga no pueden aumentar con el incremento del voltaje.

En estas condiciones los campos involucrados son relativamente bajos por ello no pueden comunicar a los electrones e iones energía cinética suficiente para colisionar e ionizar átomos del gas con lo cual se puede aumentar el transporte de carga.

[22] tILAWICZKA, P.; Introducción a la electrónica cuántica; p 155.

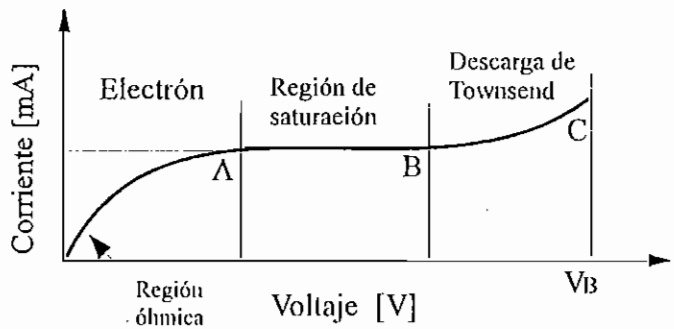



**Fig 1-7** Corrientes débiles en un gas[23]

Si después de pasar por la región de saturación se aumenta el voltaje esto provoca un consiguiente aumento en la corriente, este lapso produce una descarga llamada de Townsend.

El carácter de una descarga puede ser descrita en mejor forma si recurrimos a su característica voltaje - corriente.

### 1.3.2 DESCARGA NO AUTOSOSTENIDA

Con el fin de explicar como aparece la región de incremento de la corriente después del punto B en la figura 1-7, se debe suponer que el voltaje en este punto corresponde al potencial de ionización del gas.

[23] HLAWICZKA, P.; Introduceión a la electrónica cuántica; p 155 fig 9.3;1977.

La aplicación de un voltaje a los electrodos hace que los electrones iniciales se aceleren hacia el ánodo y los iones positivos hacia el cátodo. Si el voltaje aplicado excede el potencial de ionización del gas, los electrones iniciales producen subsecuentes ionizaciones al chocar con las moléculas del gas.

Si desde el cátodo se proyectan **No** electrones por segundo; el número de electrones por segundo a una distancia **x** (medida desde el cátodo) será **N**; en la distancia **dx** se formarán **dN** nuevos electrones por segundo fruto de la ionización del gas.

Si representamos $\alpha$ el número de nuevos electrones (o iones) formados por un electrón al recorrer una distancia de 1 centímetro a través del gas, tenemos:[24]

$$dN = \alpha . N . dx \qquad [1.7]$$

El número $\alpha$ se conoce como primer coeficiente de Townsend. Integrando la expresión anterior resulta:

$$N = No . e^{\alpha . x} \qquad [1.8]$$

Siempre que $\alpha$ sea independiente de **x**.

Se puede ver que por cada electrón que parte del cátodo, al recorrer una distancia **d**, se habrán formado $e^{\alpha.d}$ nuevos electrones (o iones).

[24] MILLMAN,J.; SEELY, S.; Electrónica; p 278, 1966.

Multiplicando cada lado de la expresión por la carga electrónica tendremos una ecuación de corrientes[25]:

$$I. = Io\ e^{\alpha . x} \qquad [1.9]$$

I .es la corriente que llega al ánodo, Io es la corriente inicial en el cátodo. Si Io se hace cero entonces I. también lo será, es decir que si cesa la excitación exterior, la descarga se interrumpe, a esto se debe el nombre de descargas no autosostenidas.

Varios experimentos muestran que $\alpha$ es una función del campo eléctrico y varía con éste, por tanto, si aumenta el campo, $\alpha$ también se incrementa.[26]

### 1.3.3 DESCARGA AUTOSOSTENIDA

Al continuar aumentando al voltaje, la intensidad de corriente en el tubo de descarga puede alcanzar valores elevados y quedará limitada principalmente por la resistencia del circuito exterior.

Aunque algunos agentes externos contribuyen a iniciar la descarga, una vez que ésta se haya iniciado continuará por si misma, de allí el nombre de descarga autosostenida.

En una descarga en la que no interviene ningún agente externo que la desencadene y mantenga, el proceso más verosímil es el de la emisión de electrones en el cátodo, debido_

[25] idem a referencia 24.
[26] REtCtt, H.;Theory and applicactions of electron tubes; p 373;1939.

al bombardeo con iones positivos.

A la corriente de electrones dentro del gas la llamaremos **Is**, la corriente de electrones debida a la excitación exterior **Ie**, y la corriente total de electrones en el cátodo Io, por tanto:

$$\mathbf{Io} = \mathbf{Ie} + \mathbf{Is} \qquad [1.10]$$

Como Ib es la corriente que llega al ánodo e Io la corriente que llega al cátodo, entonces la corriente total en cada punto del tubo es Ib, es decir de la ecuación [1.9] tenemos:

$$\mathbf{Ib} = \mathbf{Io}\ e^{\alpha \cdot x} \qquad [1.11]$$

Si cada ion positivo libera, en promedio, $\gamma$ electrones del cátodo, entonces:

$$\mathbf{Is} = \gamma\,(\mathbf{Ib} - \mathbf{Io}) \qquad [1.12]$$

Combinando las ecuaciones [1.10] [1.11] y [1.12] resulta:

$$\mathbf{Ib} = \frac{\mathbf{Ie} \cdot e^{\alpha \cdot x}}{1 + \gamma - \gamma \cdot e^{\alpha \cdot x}} \qquad [1.13]$$

El número $\gamma$ es conocido como segundo coeficiente de Townsend, es de hecho un coeficiente de emisión secundaria que expresa la relación entre el número de electrones

formados en el cátodo debido a los iones positivos que chocan contra éste; por tanto $\gamma$ responde a la siguiente relación:[27]

$$\gamma = \frac{\text{electrones secundarios}}{\text{iones incidentes}} << 1$$

El proceso de producción de electrones por bombardeo iónico es un proceso ineficaz, por ello $\gamma$ es una magnitud pequeña, sus valores van desde 0.2 a 0.001. Es decir que para liberar un electrón deben incidir en el cátodo 5 a 1000 iones positivos.[28]

El criterio de ruptura en un gas se obtiene haciendo cero el denominador de la ecuación 1.13, con lo cual la corriente aumenta ilimitadamente; es decir que:

$$1 - \gamma ( e^{\alpha \cdot x} - 1) = 0$$

$$\gamma \cdot e^{\alpha \cdot x} = 1 + \gamma$$

Como ya se ha visto que $\gamma$ es un valor mucho menor que la unidad, por ello,

$$\gamma \cdot e^{\alpha \cdot x} = 1 \qquad [1.14]$$

Donde el factor $e^{\alpha \cdot x}$ representa el número de iones positivos producidos como consecuencia de un electrón primario que deja el cátodo.

[27] HLAWICZKA, P.; Introducción a la electrónica cuántica; p 159; 1977.
[28] MILLMAN,J.; SEELY, S.; Electrónica; p 283, 1966.

Cuando los iones alcanzan el cátodo producen electrones secundarios, en número de $\gamma \cdot e^{\alpha \cdot x}$. Por lo tanto, el criterio anterior indica que la condición de ruptura se alcanza cuando por cada electrón primario se produce un electrón secundario.

Esto es razonable ya que si cada electrón inicial emitido desde el cátodo resulta en la emisión de un electrón secundario, éste podría asumir el rol originalmente trazado por el electrón inicial y la descarga continuara aun si la emisión inicial desde el cátodo cesara; es decir que se ha producido la **descarga autosostenida**.

La llegada a una descarga autosostenida se denomina **encendido**, y el voltaje al cual ocurre esto se ha dado en llamar **potencial de encendido**.

El potencial de encendido no es constante para un gas y una geometría de los electrodos dada , pero depende de algunos factores como: presión del gas, mezcla de los gases, temperatura de los electrodos, edad del tubo de descargas, etc; que causan cambios en la forma de la característica estática corriente - voltaje[29].

### 1.3.4 LEY DE PASCHEN

Si entre los parámetros que son implícitos a un gas se asume que durante el fenómeno de la descarga autosostenida la temperatura se mantiene constante[30]; entonces la presión p será el único parámetro que afecta la probabilidad de colisión ionizante expresada por $\alpha$.

[29] REICH, H.;Theory and applicactions of electron tubes; p 374;1939.
[30] HLAWICZKA, P.; Introducción a la electrónica cuántica; p 162; 1977.

Como el número de iones formados por un electrón o un ion positivo en movimiento una unidad de distancia depende sobretodo de la presión del gas [31] . Por lo tanto $\alpha = f(p)$.

Con la temperatura invariable, el aumento de la presión disminuye la distancia promedio entre moléculas, lo cual incrementa el numero de colisiones producidas por un electrón o un ion positivo por centímetro de avance en el gas.

Por efecto de la menor distancia promedio que recorren los electrones e iones entre cada choque, éstos adquieren menos energía del campo y con ello tienen menos posibilidades de ionizar una molécula. Esta energía se representa así[32]:

$$E = e \cdot E \cdot \lambda = f(e \cdot E / p) \qquad [1.15]$$

Donde:

**E** energía ganada por los electrones entre choque sucesivos.

**e** carga de los electrones

**E** campo eléctrico al que se somete el gas

$\lambda$ camino libre medio[33], el cual es una función inversamente proporcional a la presión del gas, es decir $\lambda = f(1 / p)$

[31] REICH, H.;Theory and applicactions of electron tubes; p **378**;1939.
[32] HLAWtCZKA, P.; Introducción a la electrónica cuántica; p **162**; 1977.
[33] " Elcamino libre medio será la distancia promedio recorrida por una partícula en t segundo dividida para el numero de colisiones que esta efectua en su recorrido por segundo". COBINE, J.; Gaseous Conductors; p**21** ;1958.

Por tanto $\alpha$ depende de la presión y la energía adquirida entre cada choque, así[34]:

$$\alpha = p \cdot f1 ( e \cdot E \cdot \lambda ) = p \cdot f2 \ (e \cdot E / p )$$

ó:

$$\alpha / p = f ( E / p ) \qquad [1.16]$$

Por otra parte, el segundo coeficiente de ionización $\gamma$ tiene que ver con el impacto de los iones positivos contra el cátodo. Es decir que $\gamma$ depende de la energía que ganen los iones en el último recorrido libre medio antes del impacto y será función de $E \cdot \lambda$ ó $E / p$, así[35]:

$$\gamma = f (E / p) \qquad [1.17]$$

Sustituyendo los coeficientes $\alpha$ y $\gamma$ en el criterio de ruptura [1.14], tenemos:

$$f1 (E / p) \cdot e^{p \cdot x \cdot f2 \ (e \cdot E / p)} = 1$$

Reemplazando $V = E \cdot d$ en la expresión anterior:

$$f1' (V / p \cdot d) \ e^{p \cdot d \ f2'(V / p \cdot d)} = 1$$

Tratando el producto $p \cdot d$ como una variable única, encontramos una relación funcional entre V, p y d:[36]

[34] idem a ref. 31.
[35] idem a ref. 31.
[36] MILLMAN,J.; SEELY, S.; Electrónica; p 286, 1966.

$$V = f\ (p \cdot d) \qquad [1.18]$$

Expresión que se conoce con el nombre de **Ley de Paschen** [37] y fue establecida experimentalmente en 1889[38]

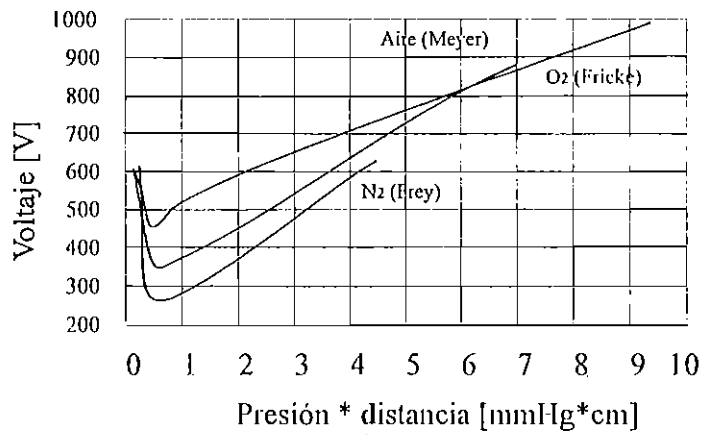



**Fig 1-8** Ley de Paschen. Tensión de ruptura con campos uniformes en función de p•d para el aire, N2 y O2. p = presión del gas en Torr; d = distancia disruptiva en cm.; ()= autores Temperatura de los gases 20 °C. Material del cátodo: latón(O2 y N2)[39]

En la expresión matemática [1.18] se ve que el voltaje de ruptura del gas no depende de la presión o la distancia independientemente sino del producto de los dos.

El gráfico 1-8, para cada gas (aire, N2 y O2), muestra que la curva que representa la Ley de Paschen presenta un mínimo en el voltaje de ruptura, a la derecha y a la izquierda_

[37] La ley de Paschen es solo una de las numerosas leyes agrupadas bajo el nombre de *principio de similutud*, el eual establece que si la geometría relativa de una descarga permanece inalterada, aunque las dimensiones reales sean cam,biadas, el voltaje y la corriente de ruptura permaneeen inalteradas. Si por ejemplo la longitud de un tubo de descarga se duplica y la presión disminuye a la mitad, el voltaje de ruyptura no cambia; si todas las áreas se triplican y la presión permanece sin cambio, entonces la densidad de corriente decrece en un tereio de su valor original.

[38] PASCHEN,F.; Wiedemann Annalen, 37, 69 (1889).

[39] ROTH, A.; Técnica de la alta tensión; p 306 fig 50/1; 1966.

del cual el voltaje necesario para perforar el gas aumenta cuando el producto **p•d** varía.

La ley de Paschen no implica que exista una relación lineal entre el voltaje de ruptura y el producto **p•d** , aunque esa linealidad puede presentarse a raíz del valor mínimo del voltaje de ruptura hacia la derecha en la curva, es decir con el incremento de **p•d** .

Si despreciamos el efecto del coeficiente secundario para valores de **p•d** mayores a **(p•d)**min. , los electrones cruzan el espacio interelectródico produciendo colisiones más frecuentes en las moléculas del gas que a valores mínimos de **p•d** . Por ello la probabilidad de ionización disminuye a menos que se incremente el voltaje.

Por otra parte, un aumento en la presión del gas reduce el camino libre medio y por ello la energía ganada entre colisiones es menor que al mínimo **p•d** . Para valores de **p•d** inferiores al mínimo, los electrones podrían cruzar el espacio interelectródico sin realizar colisiones.

El punto de **p•d** mínimo corresponde a la alta eficiencia de ionización[40].

Se ha comprobado experimentalmente que el voltaje de encendido depende también del material del cátodo y de la naturaleza del gas[41].

A continuación se presenta una tabla con los gases mas comunes y sus correspondientes voltajes de encendido

[40] KUFFEL ... p **31.**
[41] MILLMAN,J.; SEELY, S.; Electrónica; p **286, 1966.**

| *Gas* | *Voltaje de encendido (V)* | *p•d (cm • mmHg)* |
|---|---|---|
| Aire | 327 | 0.567 |
| A | 137 | 0.9 |
| H2 | 273 | 1.15 |
| He | 156 | 4.0 |
| $CO_2$ | 420 | 0.51 |
| $N_2$ | 251 | 0.67 |
| $N_2O$ | 418 | 0.5 |
| $O_2$ | 450 | 0.7 |
| $SO_2$ | 457 | 0.33 |
| $H_2S$ | 414 | 0.6 |

**Tabla 1.1**. Voltajes de encendido de algunos gases[42].

El mínimo voltaje de encendido medido en un gas dado depende sobre todo de la función de trabajo del material del cátodo.

### 1.3.4.1 INFLUENCIA DE LA FORMA DE LOS ELECTRODOS

La forma de los electrodos es decisiva en el voltaje al cual se inicia la descarga luminiscente en el gas, para una distancia y presión dados, existen grandes diferencias en el voltaje, según el campo sea más o menos uniforme.

[42] THOMSON J.J.; THOMSON G.P.; Conduction of electricity through gasses, 2, **487**.

Cuando los electrodos no forman campos uniformes entonces se produce una concentración del campo eléctrico, lo que favorece la emisión electrónica y por lo tanto el inicio de la descarga luminiscente.

Los casos extremos de este últimos género están determinados por un sistemas de placas " sin borde " (Rogowski) y por el sistema entre puntas o de punta- placa, siendo disposiciones intermedias las de esferas o esfera y placas[43].

En la práctica existe una infinidad de formas y disposiciones de los electrodos pero estas pueden, comparativamente, asemejarse a los tipos fundamentales ya descritos.

Como regla general habría que decir que, para cualquier distancia y presión dados, el voltaje de encendido será mas alta cuanto mas uniforme sea el campo eléctrico entre los electrodos[44].

### 1.3.5 DESCARGA LUMINISCENTE

Después de producirse la perforación del gas, se presenta la llamada **descarga luminiscente**, la cual se caracteriza por presentar zonas luminosas en el gas entre los electrodos, brillantes y de color diverso.

[43] ROTH, A.; Técnica de la alta tensión; p 297 ; 1966.
[44] idem a ref. 42.

En este caso la ionización esta acompañada de excitación de algunas moléculas del gas, las cuales posteriormente emiten radiación al regresar a un estado de menor energía. esta radiación visible da el nombre a la descarga.

Eléctricamente la descarga luminiscente se caracteriza por presentar una baja densidad de corriente y una elevada caída de voltaje. El voltaje necesario para mantener la descarga es muy superior al potencial de ionización del gas, pero inferior a la tensión de arco.

La diferencia entre la descarga luminiscente ( autosostenida ) y la descarga no autosostenida se ilustra en la figura siguiente.

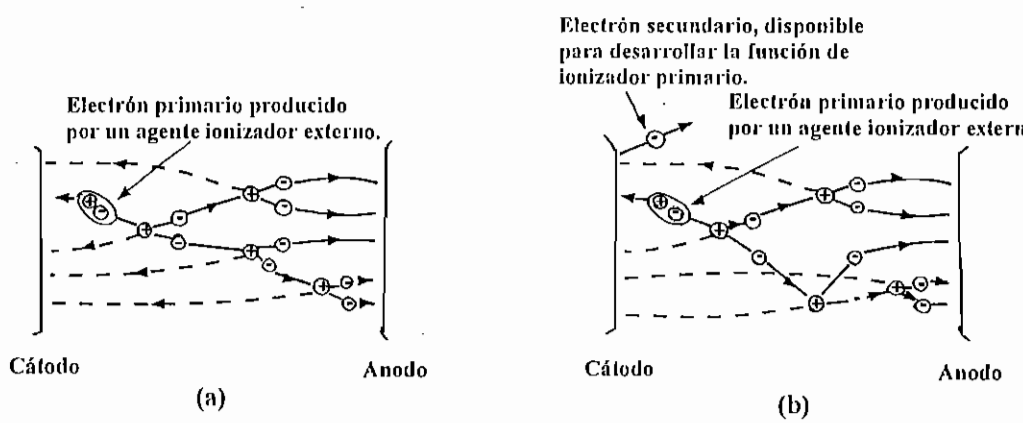



**Fig 1-9** Mecanismo y comparación entre una descarga no autosostenida y una autosostenida.[45]

Las líneas entrecortadas indican movimientos de iones y las líneas sólidas indican el camino que toman los electrones.

[45] WEED,H; DAVIS, W.; Fundamentals of electron devices and circuits; p 344 fig 13-4; 1965.

La parte **a** de la figura **1-9** muestra las condiciones en las que se produce la descarga no autosostenida. Se puede ver que los electrones primarios originales producidos por la fuente de ionización externa resultan en cuatro ionizaciones adicionales, en promedio, antes que éste golpee al ánodo. También, en promedio, cinco iones llegan al cátodo por cada cinco electrones que golpean el ánodo.

Conforme el voltaje ánodo-cátodo es aumentado, el proceso descrito llega a ser mas efectivo, ya que los electrones no requieren moverse mucho para lograr la energía de ionización. Los iones golpean al cátodo con gran energía, mientras sus energías llegan a ser lo bastante grandes como para conseguir la emisión de electrones en el cátodo provocando ionización secundaria. No todos los iones que chocan contra el cátodo producen electrones secundarios.

La producción de iones secundarios en el cátodo se eleva al punto en el que un electrón secundario es producido por cada grupo de iones causados por un electrón primario original.

Llega el momento en que el electrón secundario asume el papel del electrón primario convirtiéndose en agente ionizador externo, con lo cual la descarga se mantiene por si misma.

Esta condición es mostrada en la parte **b** de la figura **1-9**.

Hay que mencionar que el esquema mostrado en la figura **1-9** (parte **a** y **b**) es un esquema muy simplificado de los que ocurre realmente; por ejemplo no todos los iones

avanzan libremente desde el punto donde fueron formados hacia el cátodo, podrían encontrarse y recombinarse con un electrón antes de alcanzar el cátodo, o podrían dirigirse a las paredes del tubo y recombinarse allí.

En promedio, el número de electrones por unidad de tiempo que golpean el ánodo deben ser iguales al número de iones que chocan contra el cátodo mas el número de electrones secundarios producidos por el cátodo en la unidad de tiempo[46].

Los iones que golpean el cátodo se recombinan en la superficie del metal, o un poco más al interior del mismo, con los electrones de conducción libre.

En la figura **1-10** podemos ver la característica voltaje - corriente relativa a la descarga luminiscente.

En la región FH tenemos valores bajos de corriente en los cuales la luminiscencia cubre únicamente una parte del cátodo. Al aumentar la corriente en el tubo, la luminiscencia en el cátodo aumenta proporcionalmente, con lo cual la densidad de corriente permanece constante; este valor es conocido como **densidad de corriente normal.**

Las densidades de corrientes normales son de 1 [A / $m^2$]en mercurio a 1[mmHg.] de presión[47].

La región FH de la curva se caracteriza por un potencial elevado y mas o menos

[46] WEED,H; DAVIS, W.; Fundamentals of electron devices and circuits; p **345**;1965.
[47] MILLMAN,J.; SEELY, S.; Electrónica; p **295** ; 1966.

constante y es llamada región de luminiscencia normal, la cual se extiende hasta alrededor de $10^{-3}$ [A], pero puede alcanzar algunos amperios[48].

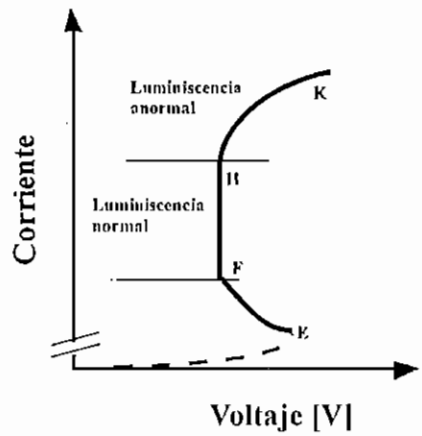



**Fig 1-10** Característica Voltaje - intensidad en una descarga luminiscente[49]

La transición desde la descarga de Townsend hacia la luminiscente está usualmente acompañada por una caída de voltaje.

Cuando el cátodo esta completamente cubierto por la luminiscencia, un posterior incremento en la corriente está acompañada por un incremento en el voltaje a través del tubo, como lo muestra el segmento HK en la característica voltaje - corriente. Esta región de operación se conoce como **luminiscencia anormal.**

Un posterior incremento en la corriente resulta en una repentina transición a una descarga en bajo voltaje llamada **Arco.** De ocurrir esto, la corriente llegaría a tener valores destructivos si no estuviera limitada por el circuito exterior.

[48] COBINE, J.; Gaseous Conductors; p 207 ;1958.
[49] MILLMAN,J.; SEELY, S.; Etectrónica; p 294 fig 10-t2; 1966.

El punto al cual esta transición ocurre generalmente es $10^{-1}$ [A][50].

Se debe recalcar que la característica voltaje - corriente es idealizada ya que los datos experimentales que se obtienen varían con el tipo de gas, cambios en la presión, forma de los electrodos y tiempo de vida del tubo de descarga.

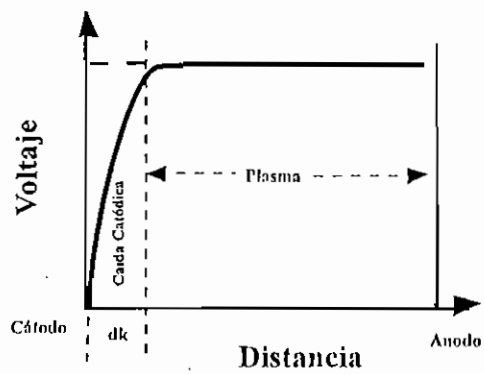



**Fig 1-11** Variación fundamental del voltaje en la descarga luminiscente[51]

Durante la descarga luminiscente, la variación del voltaje desde el cátodo al ánodo tiene la forma representada en la figura 1-11, en la cual se puede observar que casi todo el voltaje aplicado al tubo se concentra en la pequeña distancia existente entre el cátodo y el límite del plasma.

El plasma es una región luminiscente que está formada por concentraciones aproximadamente iguales de carga positiva y negativa

[50] idem a ref. 48.
[51] MILLMAN,J.; SEELY, S.; Electrónica; p 294 fig 10-13; 1966.

### 1.3.5.1 CARACTERISTICAS DE LA DESCARGA LUMINISCENTE

En la descarga luminiscente, las distribuciones de la intensidad de la luz y del potencial a lo largo de un tubo de descargas largo y estrecho operando con descarga luminiscente se describe en la figura 1-12.

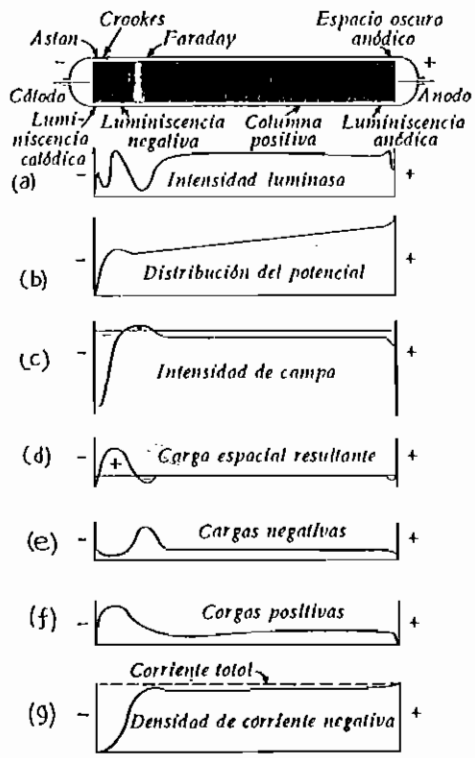



**Fig 1-12** Características eléctricas y visuales de una descarga luminiscente.

(Reproducido en referencia[52] ).

En esta gráfica se han colocado los diagramas : variación de la intensidad luminosa, potencial, intensidad de campo, densidad de carga espacial y densidad de corriente en función de la distancia entre los electrodos.

[52] MILLMAN,J.; SEELY, S.; Electrónica; p **298** fig 10-14; 1966.

La región que aparece junto al cátodo se denomina **Espacio oscuro de Aston**, es una región en la cual los electrones secundarios han adquirido solamente bajas velocidades comparadas con los iones que golpean el cátodo[53]; por ello, en la curva de distribución de potencial se puede observar una curvatura positiva.

Este espacio es oscuro porque los electrones no tienen aun suficiente energía para causar ionización.

A continuación se presenta una suave, aterciopelada luminiscencia que se conoce como **luminiscencia catódica**. En algunos casos ésta aparece adherida al cátodo disfrazando completamente el espacio oscuro de Aston.
Junto a la luminiscencia catódica tenemos el espacio oscuro de Crookes en el cual no se emite luz o ésta es muy tenue.

La causa de la luminiscencia catódica no se ha explicado con claridad. Es posible que los electrones emitidos por el cátodo atraviesen el espacio oscuro de Aston, y adquieran energía suficiente para provocar excitación y originar con ello la luminiscencia catódica.

Esta explicación contradice el hecho que los electrones que dejan el cátodo son muy pocos para producir la luminiscencia, ya que la corriente en el cátodo se constituye casi exclusivamente de iones positivos. Además " la luz emitida no coincide con el primer potencial de ionización del gas "[54].

[53] WEED,H; DAVIS, W.; Fundamentals of electron devices and circuits; p **345**;1965.
[54] MILLMAN,J.; SEELY, S.; Electrónica; p **298** ; 1966.

Junto al espacio oscuro de Crookes se presenta una zona luminosa denominada **luminiscencia negativa** la cual se inicia bruscamente y se desvanece gradualmente dando lugar al **espacio oscuro de Faraday.**

Al filo de la luminiscencia negativa, la densidad de electrones llega a ser tan grande que la densidad de carga neta (suma de carga positivas y negativas) llega a ser cero e incluso se invierte.

Ya que los electrones son frenados en esta región a una velocidad en la cual aumenta la probabilidad que los electrones causen excitación u ionización. Por esto hay una intensa luminosidad en la región de luminiscencia negativa.

Posteriormente los electrones son retardados, perdiendo su capacidad de ionización ya que la intensidad de la luminiscencia cae con la distancia produciendo el espacio oscuro de Faraday.

Después del espacio oscuro de Faraday se presenta una región de intensa luminosidad uniforme denominada **Plasma**, en la cual la carga espacial neta es cero y generalmente cubre la mayor parte de la longitud del tubo de descarga.

En el ánodo suele presentarse una región denominada luminiscencia anódica, junto al plasma, la cual esta separada del ánodo por el estrecho espacio oscuro anódico.

Si en el tubo se produce la descarga luminiscente y el ánodo es movido en dirección al cátodo, las distintas regiones de la descarga permanecen fijas con relación al cátodo, y la

columna positiva (o plasma) y el espacio oscuro de Faraday a su vez parecen moverse dentro del ánodo[55].

Si el espaciamiento de los electrodos se mantiene fijo y la presión disminuye, el espacio oscuro catódico, o espacio oscuro de Aston, se incrementa en espesor desplazando las otras regiones hacia el ánodo[56].

A partir de las figura 1-12 se puede observar que en las cercanías del cátodo existe una alta concentración de cargas positivas (e) con posibilidades de impactar el cátodo al ser acelerados por una alta intensidad de campo (d) existente entre el espacio oscuro de Crookes y el cátodo.

El espacio oscuro de Aston juega un papel importante en la energía cinética que pueden alcanzar los iones positivos por el efecto combinado de la alta energía (d) y la presencia de cargas negativas o electrones emitidos por el cátodo.

Al expandirse el espacio oscuro catódico, su límite llega a ser menos distinguible. Cuando el espacio oscuro catódico alcanza el ánodo el voltaje debe ser aumentado para mantener la descarga[57].

La disminución de la presión en la descarga luminiscente haría que los iones positivos aumenten su movilidad (debido al incremento del camino libre medio) y adquieran del campo una mayor energía para impactar al cátodo y penetrarlo mas eficazmente.

[55] REICH, H.;Theory and applicactions of electron tubes; p 369;1939.
[56] idem a ref. 54.
[57] REICH, H.;Theory and applicactions of electron tubes; p 370;1939.

Hay que recalcar que los espacios oscuros de la descarga luminiscente no están absolutamente exentos de luz, pero son relativamente oscuros respectos a las regiones luminiscentes brillantes, donde los procesos de excitación e ionización son mas activos[58].

### 1.3.5.2 DISTRIBUCION DE POTENCIAL EN LA DESCARGA LUMINISCENTE

La mayor parte del voltaje aplicado se concentra en la **caída catódica de potencial** que representa el potencial al cual se precipitan los iones positivos al dirigirse al cátodo.

La **caída catódica de potencial** o **caída catódica** es el cambio de potencial registrado en la descarga luminiscente entre la *luminiscencia negativa* y el cátodo.

Se ha determinado experimentalmente que para un gas y un material de cátodo dados, el valor de la caída catódica de potencial es del orden del valor mínimo de la tensión de descarga[59].

La caída catódica no solamente constituye la mayor caída de voltaje a lo largo del tubo de descarga sino también es funcionalmente la parte mas importante de la descarga[60].

En la siguiente tabla registran los siguientes valores de calda de potencial para el nitrógeno con el uso de varios tipos de metales en los electrodos.

[58] COBINE, J.; Gaseous Conductors; p 213 ;1958.
[59] MILLMAN,J.; SEELY, S.; Electrónica; p 295 ; 1966.
[60] WEED,H; DAVIS, W.; Fundamentals of electron devices and circuits; p 347;1965.

| *Material del cátodo* | *Al* | *Ag* | *Au* | *Cd* | *Cu* | *Fe* | *Mg* | *Na* | *Ni* | *Pb* | *Pt* | *Sn* | *Zn* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Voltaje (V) | 180 | 233 | 233 | 213 | 208 | 215 | 188 | 178 | 197 | 210 | 16 | 216 | 216 |

**Tabla 1.2** Caídas de potencial para diferentes tipos de electrodos[61]

La razón de esto es que los iones producidos en la luminiscencia negativa son acelerados hacia el cátodo por la caída catódica de potencial. Los iones suelen adquirir suficiente energía para producir electrones secundarios en el cátodo, necesarios para mantener la descarga y simultáneamente penetrar el material del cátodo. Esta es la base del preceso de nitruración iónica..

Por lo tanto los fenómenos en y cerca del cátodo son esenciales para mantener la descarga y el plasma (o columna positiva ) solamente sirve para mantener el camino de conductividad para la corriente[62].

La caída catódica es substancialmente independiente de la presión[63].

Si con voltaje constante, aumentamos la presión, la distancia entre el cátodo y la luminiscencia negativa disminuye ya que la distancia se ajusta por si misma para mantener el producto p•d que para cada gas es una constante.

El espesor de la caída catódica, a temperatura ambiente, para el nitrógeno con diferentes materiales del cátodo esta dada por:

[61] COBINE, J.; Gaseous Conductors; p 217 ;1958.
[62] idem ref. 57.
[63] idem ref. 60.

| *Material del cátodo* | *Al* | *Fe* | *Mg* |
|---|---|---|---|
| Espesor (cm. mmHg) | 0.31 | 0.42 | 0.35 |

**Tabla 1.3** Espesor de la caída catódica con varios materiales del cátodo[64]

De acuerdo con Von Engel cuando $\mathbf{R} \cdot \mathbf{p} < 2 \times 10^{-2}$ cm • mmHg se requieren voltajes muy altos para mantener la luminiscencia; **R** es el radio del tubo de descargas y **p** la presión del gas.

La figura muestra el efecto de la reducción del producto **R** • **p** en la caída catódica.

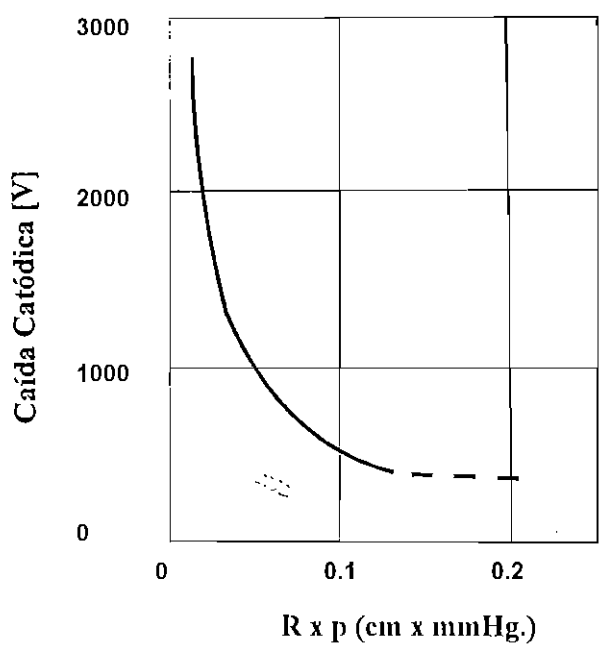



**Fig 1-13** Descarga luminiscente restringida - caída catódica de una descarga restringida en aire como función del radio del tubo Rp ( R = 1 cm). (A. Von Engel, Ref 4, p 208.)[65]

[64] COBINE, J.; Gaseous Conductors; p 218 ;1958.
[65] BLEULER E.;HAXBY R.O.; Electronic methods; p 87 fig 6; 1964.

La caída catódica se incrementa casi linealmente con la función de trabajo del material del cátodo[66]. Esto es razonable, ya que para mantener la descarga se requiere la emisión de electrones desde el cátodo (en un proceso secundario).

### 1.3.5.3. DISGREGACION EN EL CATODO

Durante una descarga luminiscente el cátodo esta sometido a un constante bombardeo por parte de los iones positivos que chocan contra éste.

Este bombardeo puede ser tan intenso que puede causar una continua desintegración del cátodo con su consiguiente desgaste. Este proceso se conoce como disgregación o chisporroteo (¨ sputtering ¨) del cátodo.

Las partículas perdidas por el cátodo se depositan en películas en las paredes causando un oscurecimiento de la superficie transparente del tubo de descarga.

También aumenta la probabilidad de conducción y pérdidas eléctricas a lo largo de la superficie interior del tubo[67].

## 1.3.6 DESCARGA LUMINISCENTE A ALTAS PRESIONES

La luminiscencia a alta presión difiere de la de baja presión en que en la primera_

[66] COBINE, J.; Gaseous Conductors; p 216 ;1958.
[67] MtLLMAN,J.; SEELY, S.; Electrónica; p 301 ; 1966.

disminuye el espesor de la caída catódica, ya que ésta varía con el inverso de la presión.

Además se conoce que la densidad de corriente en la descarga luminiscente normal varía con el cuadrado de la presión del gas, por tanto, la energía disipada en la región de la caída catódica se incrementa de acuerdo a la presión.[68]

Por esta razón la tendencia de la descarga luminiscente a convertirse en una descarga por arco aumenta a altas presiones.

Al aumentar la presión es necesario colocar los electrodos mas juntos para tener la descarga luminiscente en el mínimo de la curva de Paschen.

Si se mantiene constante la separación de los electrodos, la tensión de encendido aumenta en una forma aproximadamente lineal con la presión, de acuerdo a la Ley de Paschen. A presiones más altas (superiores a la atmosférica), no se verificará este hecho, y la Ley de Paschen no es válida[69].

La luminiscencia a alta presión es usada en ciertos tipos de descargadores de rayos y mas recientemente en la nitruración de aceros[70].

### 1.3.7 ARCO ELECTRICO

Después de pasar por la luminiscencia anormal, la cual se caracteriza por un

[68] COBINE, J.; Gaseous Conductors; p 251 ;1958.
[69] HLAWICZKA, P.; Introducción a la electrónica cuántica; p 169; 1977.
[70] BLEULER E.;HAXBY R.O.; Electronic methods; p 87 ; 1964.

aumento de la densidad de corriente y una aumento de la caída de potencial en el tubo, se produce una transición brusca en la que la caída de tensión disminuye rápidamente y la densidad de corriente aumenta hasta que la corriente se concentra en una pequeña mancha en el cátodo y la descarga se convierte en un **arco**.

En la descarga por arco, como en la luminiscencia, también se dispone de una columna positiva y una caída catódica la cual es pequeña, dando ligar a campos eléctricos intensos en las proximidades del cátodo.

Los altos valores del campo eléctrico sugieren dos posibles explicaciones para la producción del arco : **1.** emisión termoiónica ó **2.** emisión por campo intenso.

En al descarga luminiscente anormal, el bombardeo del campo con iones positivos produce la elevación de la temperatura del cátodo, la cual puede alcanzar valores suficientes como para provocar la emisión de electrones termoiónicos. La emisión de estos electrones será mayor que cuando se tenía el proceso de emisión secundaria en la descarga autosostenida.

En cambio el problema es diferente cuando tenemos un cátodo construido de un metal de punto de ebollución bajo.

En este caso la descarga recibe el nombre de **arco de cátodo frío**, y se piensa que la misma se mantiene por un intenso flujo de electrones procedentes del cátodo y producidos por emisión de campo[71].

[71] HLAWICZKA, P.; Introducción a la electrónica cuántica; p **168**; 1977.

Las dos explicaciones de cómo se produce el arco difieren en que en la primera la transición desde la descarga luminiscente anormal al arco se produce de forma paulatina, en cambio en el arco con cátodo frío la transición es abrupta.

En la figura podemos ver la característica voltaje - corriente para todo el proceso que se produce en un gas hasta llegar a la descarga por arco.

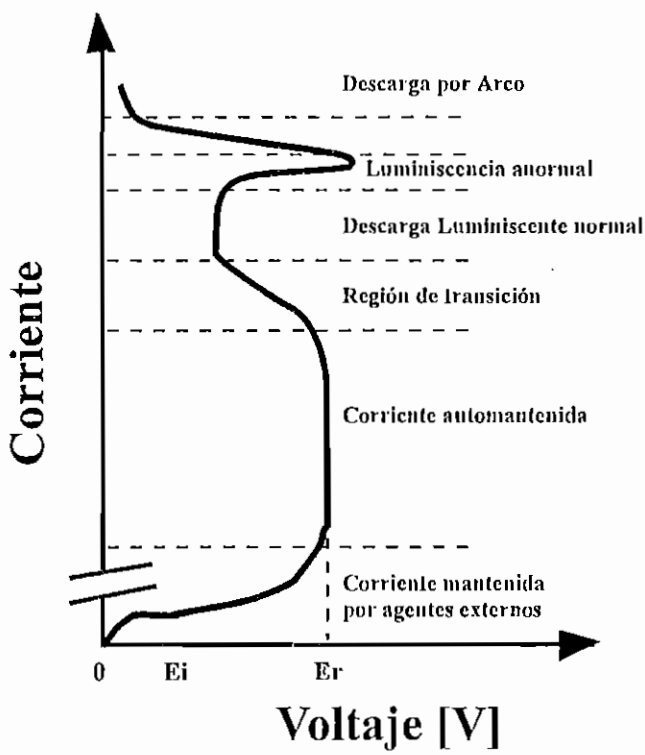



**Fig 1-14** Característica voltaje - corriente de una descarga en atmósfera gaseosa. ( Según M.J. Druyvesteyn and F.M. Penning, Revs. Modern Phys, **12**, 87, 1940) [72]

[72] MILLMAN,J.; SEELY, S.; Electrónica; p **301** fig 10-15; 1966.

### 1.3.8 COMPARACION ENTRE DESCARGAS LUMINISCENTES Y DE ARCO

Entre ambas descargas se pueden encontrar semejanzas y diferencias:

*Semejanzas:*

**1.** La característica tensión - intensidad es similar en ambas descargas.

**2.** La característica tensión - distancia es semejante, en ambas tenemos: caída catódica, plasma y caída anódica.

*Diferencias:*

**1.** La descarga luminiscente presenta baja intensidad de corriente pero voltaje elevado , en cambio el arco se produce con baja tensión y alta intensidad de corriente.

**2.** En la descarga luminiscente el suministro de electrones para mantener la descarga se produce mediante el mecanismo de emisión secundaria (desprendimiento de electrones del cátodo al chocar contra éste iones positivos). En el arco los procesos de suministro de electrones se hacen mediante la emisión termoiónica o la emisión por campo intenso.

## 1.4 LA NITRURACION

La nitruración es un procedimiento termoquímico de endurecimiento superficial en el que por adsorción de nitrógeno, a una temperatura dada, se consiguen durezas extraordinarias en la periferia de las piezas de acero.

La acción endurecedora que el nitrógeno ejerce sobre el hierro y los aceros fue descubierta por Fremy hacia el año de 1861, al experimentar la acción del amoníaco sobre las piezas de acero calentadas a elevadas temperaturas.

A pesar del gran interés que parecía tener el proceso, pasaron muchos años sin que este método tuviera aplicaciones industriales con éxito, debido a la fragilidad con que contaba la capa superficial dura de los aceros nitrurados.

En el año 1923, el, Doctor Fry, descubrió que el problema de la fragilidad de la capa exterior de las piezas nitruradas podía ser resuelto con el empleo de una temperatura de nitruración relativamente baja ( unos 500 °C aproximadamente) y con el uso de aceros con aluminio, cromo y molibdeno en lugar de aceros ordinarios al carbono.

La nitruración tradicional es un proceso termoquímico ya que para que se produzca la formación de nitruros se requiere calentar el material que se va a tratar hasta una cierta temperatura "crítica" en la cual el nitrógeno se difunde con mayor facilidad dentro del material.

En cambio la nitruración que se abordará más adelante en este trabajo se refiere a un proceso físico-químico, ya que el ingreso de nitrógeno dentro del material esta dado por el bombardeo de iones positivos de nitrógeno sobre la superficie de la muestra que se va a trabajar. El calentamiento del material, en este caso, es consecuencia directa del intenso bombardeo iónico sobre la superficie tratada.

En cualquiera de los dos casos, la nitruración proporciona gran dureza superficial y resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión de la capa superficial de las piezas, saturándolas con nitrógeno; y como el tratamiento se efectúa a temperaturas relativamente bajas casi no hay deformaciones; en especial en la nitruración iónica (físico-química) las deformaciones se reducen debido a que el calentamiento se concentra principalmente en ciertas áreas tratadas y no en todo el volumen de la pieza.

Para el tratamiento tradicional, os objetos que se desea nitrurar son siempre templados y revenidos antes de la nitruración, para que el núcleo central quede con una resistencia elevada y sea capaz de resistir, durante el trabajo, las grandes presiones que le transmitirá la capa exterior dura. Las piezas después de templadas y revenidas se colocan en una caja cerrada, a través de la cual se hace pasar durante toda la operación una corriente de amoníaco.

Después del tratamiento térmico (templado y revenido), las piezas se someten a la nitruración en un horno de mufla (500 - 520 °C) por el cual se hace pasar amoníaco. El amoníaco se descompone a altas temperaturas formando el nitrógeno atómico de acuerdo a:[73]

[73] LASHERAS,M.; Tecnología de los materiales industriales; Vol 1; p 470.

$$2\,NH_3 + \text{calor} \rightarrow 2N + 3\,H_2$$

El nitrógeno es absorbido por la superficie del acero.

La dureza se atribuye a la formación de nitruros de los elementos de aleación de acero, principalmente de Al, Cr, Mo, etc.

La profundidad de la capa nitrurada depende de la temperatura y la duración del proceso. Para nitrurar entre 0,15 a 0,3 mm. de profundidad a 500 - 520 °C. se requieren 24 horas y para una capa de 0,4 mm. cerca de 48 horas. Con procesos normales de 20 a 80 horas de duración se obtienen capas nitruradas de espesores variables desde 0,2 a 0,7 mm.

La temperatura no suele pasar de 500 °C, pues si se operase a mayor temperatura se obtendrían capas nitruradas muy frágiles. Precisamente el operar a baja temperatura es una de las ventajas de la nitruración, pues así no hay aumento del tamaño del grano ni es preciso someter las piezas a ningún tratamiento posterior, ni a ninguna operación de acabado, puesto que no sufren prácticamente deformaciones, bastando, en el peor de los casos, un ligero rectificado.

Las piezas nitruradas se templan siempre y revienen[74]; pero, a diferencia de la cementación, el tratamiento se efectúa antes y no después de la nitruración. Y esto es porque el tratamiento térmico no solo no aportaría a la capa nitrurada ninguna mejora, sino que la perjudicaría y además produciría deformaciones en la pieza. En cambio, templados

[74] Estos procesos se definen en el segundo capítulo.

los aceros antes de la nitruración, resisten mejor las fuertes presiones ejercidas por la capa nitrurada sobre el núcleo.

Como después de la nitruración, las piezas quedan ya duras superficialmente, no es necesario enfriarlas rápidamente desde elevadas temperaturas, después de estar completamente mecanizadas, como se hace en la cementación, evitándose, por tanto, las deformaciones que en esos enfriamientos se originan. Además la nitruración no modifica las características que se han obtenido previamente en el núcleo por temple y revenido, siempre que este último haya sido hecho a temperatura superior a 500 °C.

La nitruración se usa no solo para endurecer superficialmente las piezas de maquinaria, como cigüeñales, etc., sino también herramientas como brocas, etc. cuyo rendimiento mejora notablemente.

Con la nitruración se obtienen durezas muy elevadas, superiores a los 1000 Vickers ( 78 HRc), que se mantienen a temperaturas cercanas a los 500 °C. Se confiere a las piezas resistencia a la corrosión del agua dulce, agua salada, atmósferas húmedas, etc.

Tiene el inconveniente que la nitruración produce mayores durezas en aceros especiales ya que este proceso en aceros al carbono no proporciona alta dureza, y de que las instalaciones para la nitruración resultan costosas para talleres pequeños.

# CAPITULO 2

# LA NITRURACION GASEOSA

# INTRODUCCION

Este capítulo aborda el tema de la nitruración gaseosa en metales férreos usando dos tecnologías diferentes en cuanto a la forma de llevarlas a la practica pero similares en los resultados que con cada una se obtienen.

Se da inicio al estudio con una revisión accrca de los conceptos de la difusión en los metales, lo cual es requisito básico para poder entender el comportamiento de los átomos de nitrógeno una vez que estos se sitúen en las inmediaciones del metal y comiencen a penetrar en el.

Se estudian las energías involucradas en el proceso de difusión en un metal y las diferentes formas en que un átomo se difunde en el cuerpo cristalino.

Para facilitar la comprensión de las disposiciones microscópicas que adquieren los metales férreos (con contenidos de elementos de aleación como el carbono) cuando son nitrurados se abordan conceptos sobre los llamados " diagramas de fase " para el hierro y el acero y el hierro nitrurado. Inmediatamente se estudia el mecanismo de formación por el cual la nitruración se produce.

En la practica todos los aceros pueden ser nitrurados pero mas adelante se vera que ciertos elementos de aleación en el hierro favorecen o se oponen a la formación de nitruros de hierro, los cuales son elementos básicos para la nitruración.

Se entra en detalle al abordar el tema de la nitruración con gas, la preparación de las piezas que van a ser nitruradas y mas concretamente en el aspecto central de este estudio: la nitruración iónica, el tipo de instalaciones que se usan, el proceso tecnológico que se sigue y las ventajas que esta tiene sobre la nitruración convencional (termoquímica).

A continuación se revisan las alteraciones que se producen en las piezas nitruradas: variaciones en su resistencia mecánica, deformaciones y defectos y los pasos para determinar el grado de nitruración de los metales a usar en el laboratorio.

Finalmente en la parte de las ventajas se destacan los beneficios que la nitruración presenta en comparación con otros proceso de endurecimiento; y los posibles usos y aplicaciones cuando se nitruran elementos de herramientas y maquinaria.

## 2.1 DIFUSION EN LOS METALES

De manera general, la interacción de los metales con los gases está constituída por la adsorción química o activada, la difusión, la disolución y la interacción química del metal con el gas, con lo cual se forman compuestos químicos.

" Se llama **Adsorción** a la penetración del gas en el metal y la distribución de las moléculas y los átomos, que lo componen, en el volumen del metal ". [1]

La adsorción puede ser **física** o de **quimiosorción**. En el primer caso las moléculas o los átomos o las moléculas se mantienen en la superficie debido a las fuerzas de Van Der Waals[2], en cambio, en el caso de la *quimiosorción* el elemento que se difunde reacciona químicamente con la superficie metálica, es decir, tiene lugar la transferencia electrónica.[3]

Las moléculas del gas no se pueden difundir en los cuerpos sólidos. Solo después que la molécula se disocie en átomos en la superficie del cuerpo sólido, los átomos, que forman la molécula, penetran en el metal. Por ello el estado de la superficie influye mucho sobre la velocidad de la difusión.

---

[1] KOLACHEV, B.A.; GABIDULLIN,R.M.; PIGUZOV, Yu; Tecnología de tratamiento térmico de los metales y aleaciones no férreas; p (33); 1983.

[2] Las fuerzas intermoleculares, también llamadas de Van der Waals o uniones secundarias, son fuerzas débiles que producen la interacción mutua de moléculas o átomos inertes. JASTREVSKI p(27).

[3] LAJTIN,Yu ; ARZAMASOV,B; Tratamiento químico térmico de los metales; p(23) 1987.

Al existir películas de óxido y otros, el proceso de difusión se desacelera con intensidad y en estas condiciones la velocidad de difusión a menudo no depende de la presión del gas y queda definida por los poros y las grietas en dicha película.

La mayoría de investigadores coinciden que el productor de procesos de nitruración es el nitrógeno molecular.

Aditivos, impurezas u otros elementos pueden ayudar u obstaculizar el proceso de nitruración en el superficie de un metal. El oxígeno se adsorbe en la superficie más sólidamente que el nitrógeno ( debido a su mayor afinidad electrónica ) y obstaculiza la adsorción de éste.

Al calentar el metal en nitrógeno gaseoso con contenido de aire el metal se oxida pero no se nitrura. Por ello se debe eliminar la película de óxido mediante un procedimiento mecánico o químico: pulverización catódica en una descarga luminiscente, reducción con hidrógeno a temperatura elevada, etc.[4]

El hidrógeno favorece la nitruración, por ello el amoníaco ($NH_3$) es un medio nitrurante mejor que el nitrógeno molecular; el nitrógeno reacciona con el metal y el hidrógeno permanece en el ambiente sin reaccionar.

[4] Idem a referencia 2.

En la nitruración ordinaria, la molécula de $N_2$, en el interior del cristal metálico, bajo el efecto de las fuerzas de Van Der Waals se mueve hacia la superficie, perdiendo energía potencial y ganando energía cinética.

Al aumentar la energía cinética, la molécula de nitrógeno, venciendo las fuerzas de repulsión, se acerca a una distancia de 0.1 a 0.2 nm de la superficie lo que posibilita una integración electrónica.

La molécula se desintegra en dos átomos, que pierden energía potencial y se atraen por la superficie a consecuencia de la adición de electrones libres del metal a los átomos de nitrógeno, es decir se presenta la quimiosorción.

En cambio en la nitruración iónica, la superficie del metal se bombardea con iones de gas positivos. Durante este proceso en una atmósfera de nitrógeno puro, se nitruran el acero o el hierro, luego de una pulverización catódica preliminar de la superficie de saturación.

En la nitruración iónica, la superficie del metal se bombardea de manera continua y se calienta por el bombardeo de los iones positivos del nitrógeno molecular y elemental.[5]

[5] LAJTIN,Yu ; ARZAMASOV,B; Tratamiento químico térmico de los metales; p(24) 1987.

## 2.1.1 MECANISMO DE LA DIFUSION

" Por **difusión** se entiende el desplazamiento de los átomos en el cuerpo cristalino a distancias que superan los medios interatómicos de la sustancia dada " . [6]

En la difusión se produce el desplazamiento de los átomos en el cuerpo cristalino a distancias que superan las medias interatómicas de la sustancia dada.

La autodifusión consiste en el desplazamiento de los átomos en el metal puro.

La difusión que provoca una recristalización fásica ( formando nuevas fases ) con frecuencia se denomina reactiva o de reacción, este tipo de difusión se presenta al saturar el acero con nitrógeno, cromo, silicio, etc.[7]

La difusión controla la aparición de muchos fenómenos de "transporte" o "acarreo" de masa dentro de un sólido, y entre sólido y sólido, sólido y líquido y sólido y gas. Este fenómeno consiste en un movimiento de átomos, iones, o moléculas como el producto de perturbación o agitación térmica.

La difusión es muy rápida en gases y líquidos, pero es un proceso lento en los sólidos, en los cuales el movimiento de los átomos está restringido notablemente. A pesar de lo señalado, la difusión rige la mayor parte de las reacciones de estado sólido.

---

[6] Idem a referencia 5.
[7] LAJTIN,Yu ; ARZAMASOV,B; Tratamiento químico térmico de los metales; p(26) 1987.

## 2.1.2 DIFUSION EN LOS CUERPOS SOLIDOS

La difusión de los sólidos se lleva a cabo por el desplazamiento relativo de los átomos o moléculas dentro de dichos sólidos. Para que cualquier átomo o molécula se mueva de una posición a otra dentro del retículo del cristal, debe traspasar la barrera de energía potencial y poseer un espacio al cual pueda llegar.

Para que esto ocurra se requiere : 1) una cierta energía de activación que se origina en la vibración térmica de los átomos o moléculas, y 2) la presencia de vacíos u otros defectos en el cristal.

En el caso de átomos intersticiales, éstos saltan de un espacio intersticial al próximo, al ejercer compresión entre los átomos del retículo del cristal. De este modo, el número de átomos que se difunden corresponderá al número de átomos activados que traspasan la barrera de energía, en una unidad de tiempo.

El concepto de difusión no se aplica al movimiento de átomos aislados, sino que se debe a un flujo macroscópico de la sustancia; al desplazamiento macroscópico de la misma es el resultado de un enorme número de traslaciones pequeñas de átomos aislados, involucra la existencia de una gradiente de difusión que regula la dirección de los atomos difundidos.

Cuando se tienen dos o mas componentes, la difusión es posible únicamente si uno de los componentes es soluble en el otro. Esto implica que hay diferentes formas por las cuales un átomo se difunde en el cuerpo cristalino (en el metal). Las principales son:[8]

*Mecanismo cíclico.* En este mecanismo, unos cuantos átomos ( 3 ó más) situados mas o menos en circulo se mueven coordinadamente de modo que todo el anillo de átomos da vuelta en una distancia interatómica . Un caso particular de este mecanismo es el de intercambio en donde se produce el cambio de lugar entre dos átomos vecinos.

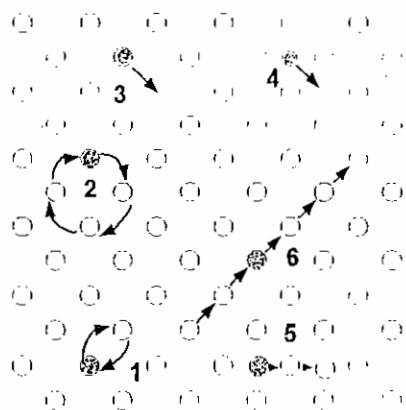



**Fig. 2-1.** Posibles mecanismos de difusión. 1. de intercambio simple, 2.de intercambio cíclico o anular, 3. de vacancias, 4. simple intersticial (intersticial directo), 5. mecanismo intersticial (intersticial por desalojo), 6. de aglomeración.[9]

*Mecanismo de aglomeración.* En este caso en una fila de empaquetamiento_

[8] JASTRZEBSKI, ZBIGNIEW; Naturaleza y propiedades de los materiales para ingeniería; p(130); 1979.
[9] BOKSHTEIN, B.,S.; Difusión en metales; Fig. 14p(63); 1980.

de los átomos mas o menos denso surge un átomo de más. La configuración de aglomeración puede trasladarse a lo largo de esta fila ya que la distorsión se propaga a lo largo de una línea y la energía del desplazamiento atómico no es grande.

*Mecanismo de vacancia.* En una red cristalina, sobretodo a temperaturas elevadas se presentan vacancias. Estas permiten que le difusión se produzca por el intercambio entre un átomo y una vacancia.

Este mecanismo se presenta durante la autodifusión.

*Mecanismo internodal.* En este caso el átomo se desplaza dentro del cristal, saltando de un espacio internodal a otro. La migración por espacios internodales es posible solo cuando existe una difusión de pequeñas impurezas de átomos que dan origen a soluciones sólidas intersticiales y al saltar desplazan relativamente poco a los átomos del disolvente de sus nudos en la red.

Para la difusión en el hierro de los no metales como el C, N, B se usa el mecanismo internodal; estos elementos cuyo radio atómico es pequeño, forman con el hierro soluciones sólidas intersticiales y para llevar a cabo la difusión sus átomos deben vencer una barrera de energía.[10]

[10] LAJTIN,Yu ; ARZAMASOV,B; Tratamiento químico térmico de los metales; p(29) 1987.

La figura 2-2 muestra el mecanismo de difusión internodal y la energía potencial de un cristal en función de la posición del átomo difundidor. La energía del cristal alcanza su valor máximo en el punto **b**. El aumento de la energía que se manifiesta al desplazar el átomo de un espacio internodal a otro adyacente, se debe al surgimiento de las tensiones elásticas, que se producen al forzar al átomo que migra a ingresar por el espacio estrecho entre los átomos del disolvente.

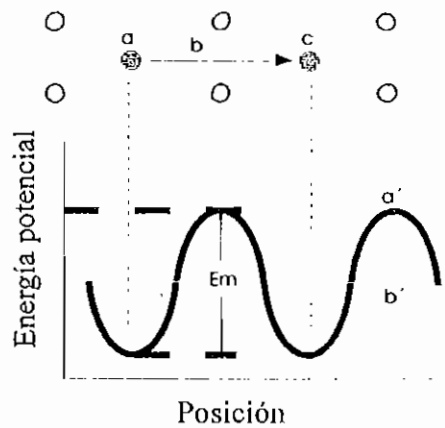



**Fig. 2-2.** Energía potencial de los átomos "migratorios" como una función de su posición reticular.Cuando un átomo salta de una posición a otra, **Em** es la energía de activación necesaria para traspasarla barrera potencial. Las posiciones **a** y **c** son,posiciones de equilibrio en el retículo. La posición **b** llamada también "punto de depresión", es la posición del átomo que se difunde en el estado activado.[11]

La probabilidad que un átomo de saltos de una posición de equilibrio a otra depende exponencialmente de la temperatura. Por ejemplo a la temperatura ambiente el átomo de carbono que se difunde en la red de hierro por los intersticios internodales, da un salto en 25 segundos, mientras que a 1545°C se producen $2x10^{11}$ átomos por cada segundo.[12]

[11] JASTRZEBSKI, ZBtGNIEW; Naturaleza y propiedades de los materiales para ingenieria; Fig. 5-2 p(130); 1979.
[12] LAJTIN,Yu ; ARZAMASOV,B; Tratamiento químico térmico de los metales; p(30) 1987.

Al elevar la temperatura, las oscilaciones de las partículas en los nodos de la red se intensifican, algunas de las partículas (en cantidades cada vez mayores) obtienen una energía que sobrepasa la energía media del movimiento térmico y que es suficiente para que éstas puedan abandonar su posición en la red y pasen a otra posición.

Se puede demostrar que la velocidad de crecimiento para una concentración fija de nitrógeno es una simple función del coeficiente de difusión. Esta relación puede expresase por:[13]

$$d = k\sqrt{D \cdot t} \qquad [2.1]$$

**d** : desplazamiento durante un tiempo t.

**D** : coeficiente de difusión.

**K** : constante de proporcionalidad.

La energía de activación determinada experimentalmente es de 17800 [cal.gr/mol], la cual, comparada con otros resultados conocidos, permite suponer que el crecimiento de la capa nitrurada es una reacción controlada por la difusión.[14]

En la nitruración se incorpora nitrógeno en el acero por difusión, para provocar cambios de propiedades en la superficie de las piezas. Debido a su pequeño_

[13] ACEROS DE LLODIO S.A.; Tratamiemtos térmicos de herramientas de aceros; p(229); 1973.
[14] Idem a referencia 9.

radio atómico (0,52 Å en comparación con 0,71 Å del carbono), el nitrógeno puede penetrar con facilidad en la red del hierro. Para ello, sin embargo, es indispensable que el nitrógeno tenga la forma atómica[15]

## 2.2 FORMACION Y ESTRUCTURA DE LA CAPA NITRURADA

### 2.2.1. DIAGRAMAS DE FASE

Los aceros que se usan en la industria se componen de hierro y carbono en diferentes proporciones dependiendo de las características y propiedades que se deseen conseguir en el acero. El contenido en carbono que suele añadirse al hierro va desde 0.035% a 1.7% llegando en casos excepcionales a ser de 2.2%.[16]

Con el propósito de facilitar el estudio de la composición hierro-carbono y posteriormente la del hierro -nitrógeno se utilizan los denominados **diagramas de composición** (o de fases), los cuales son una representación esquemática de los formaciones o fases que se presentan con el enfriamiento y calentamiento de compuestos y aleaciones.

Si se funde un metal puro y luego se lo deja enfriar lentamente, se observará que su enfriamiento es continuo y uniforme hasta llegar a un punto en que la temperatura

[15] STÜDEMAN Hans; Tratamiento térmico de los aceros; p(224) ; 1980.
[16] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; p(2) ; 1968.

se estabiliza momentáneamente. Es en este instante que el metal se solidifica completamente, luego de lo cual continua descendiendo su temperatura lentamente.

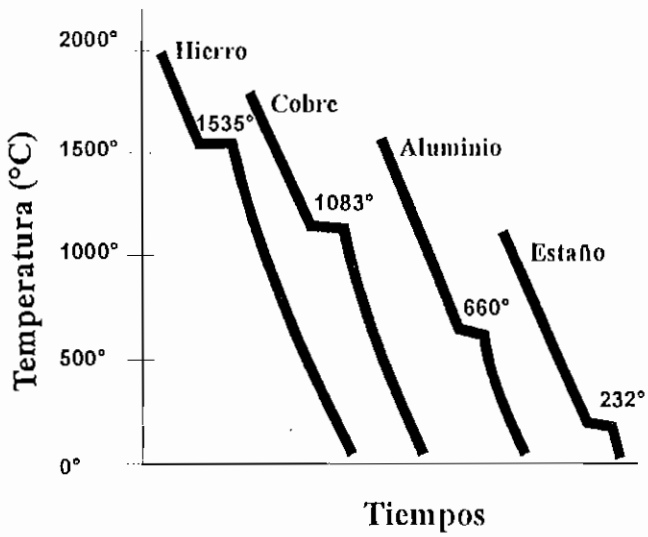



**Fig. 2-3.** Curvas de enfriamiento de diversos metales [17]

En la figura 2-3 se puede apreciar el enfriamiento de varios tipos de metales, en donde la ordenada representa la variación de temperatura y las abcisas el tiempo durante el cual se produce esta variación.

Se debe recordar que los metales que se usan a diario casi siempre tienen elementos de aleación, los cuales provocan alteraciones en la velocidad de enfriamiento.

Para ilustrar este fenómeno se tomará como ejemplo el caso del agua a la que se añaden diferentes cantidades de cloruro de sodio (sal común).

[17] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros;Fig. 1 p(2); 1968.

Al ensayar una serie de soluciones con concentraciones cada vez mayores de ClNa, partiendo de agua pura, observamos que la temperatura a la que comienza la cristalizacion disminuye de solución en solución, en una de estas concentraciones se encuentra la **eutéctica** que es aquella en la cual se presenta la menor temperatura de solidificación comparada con el resto de soluciones.

Si se continúa aumentando la sal, en una cantidad mayor que en la solución eutéctica, la temperatura de inicio de la solidificación se aumenta.

Se puede ver que en la curva que describe la concentración eutéctica, al igual que en la que representa el agua pura, la solidificación se produce brusca y completamente a una temperatura dada.

En las curvas (2), (3) y (5) de la figura 2-4, vemos que se presentan puntos de detección de la solidificación, los mismos que se presentan a temperaturas mayores a la eutéctica.

Estos puntos se presentan porque en concentraciones bajas en sal (menores a la eutéctica) su enfriamiento produce primero cristales de agua los que aumentan la concentración de la sal.

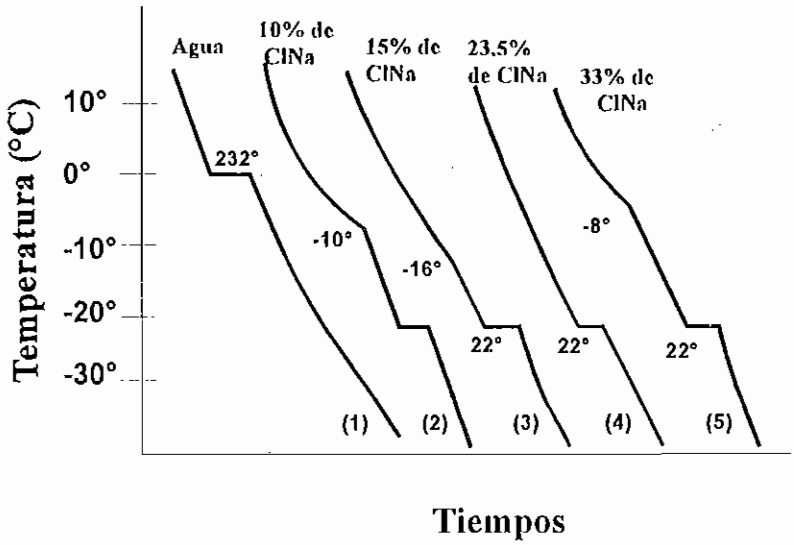



**Fig. 2-4.** Curvas de enfriamiento de diversas soluciones de cloruro sódico.[18]

En las curvas que presentan mayores concentraciones de sal ( mas que en la eutéctica) el enfriamiento forma inicialmente cristales de sal con lo cual se aumenta la concentración de agua y por ende varía la temperatura de solidificación de la solución.

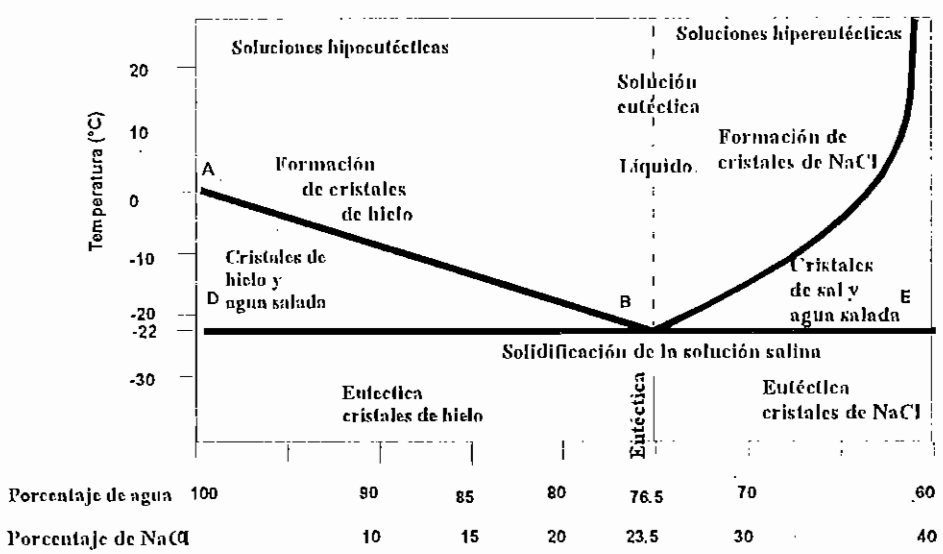



**Fig. 2-5.** Diagrama agua-cloruro sódico.[19]

[18] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; Fig 2 p(3) ; 1968.
[19] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; Fig 3 p(4) ; 1968.

En la figura 2-5, denominada diagrama Agua-Cloruro sódico se resume lo dicho anteriormente. En la cual la línea A-B señala las condiciones de temperatura y concentraciones necesarias para formar los cristales de hielo, la línea B-C expresa la formación de cristales de ClNa y la línea D-E la solidificación de la concentración eutéctica con 23.5% de ClNa.

### 2.2.1.1 DIAGRAMA HIERRO-CARBONO

Generalmente el hierro se encuentra combinado con el carbono formando carburo de hierro con un contenido máximo de 6.67%.[20]

En la nitruración se usan piezas de acero con un contenido en carbono de 0.2 a 0.6%, aleados con aluminio, cromo, molibdeno y vanadio.

De manera similar que en el caso del agua y del cloruro de sodio, donde se presentaban cristales de agua o de cloruro de sodio al descender la temperatura, en este caso tenemos un compuesto de hierro y carburo de hierro, sólida en forma de cristales de austenita, que al enfriarse se transforma en cristales de hierro (ferrita), cristales de carburo de hierro (cementita) y cristales de composición eutectoide con 0.9% de carbono (perlita).

La composición de los cristales de hierro (con carburo de hierro -$Fe_3C$- en_

[20] LAJTIN,Yu ; ARZAMASOV,B; Tratamiento químico térmico de los metales; p(65); 1987.

disolución) es variable, oscilando el contenido de carburo desde 0 hasta un máximo de 25.5% (1.7 % de carbono). Estos cristales de hierro con pequeñas cantidades de carburo de hierro que se van precipitando a alta temperatura, se denominan cristales de austenita.

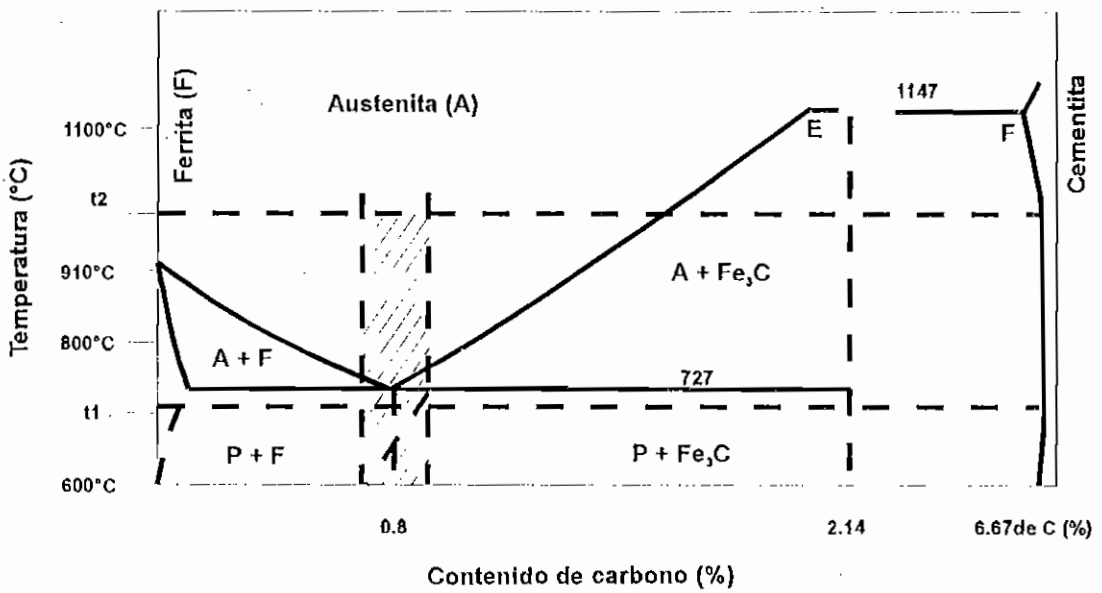



**Fig. 2-6.** Esquema del diagrama de estado Fe-$Fe_3C$. La región subrayada corresponde a las concentraciones recomendables de carbono en la capa cementada: A, austenita; F ferrita; P perlita.[21]

Para la nitruración se utilizan aceros con bajo contenido en carbono (inferior a 1.7%) los cuales se encuentran en estado sólido a una temperatura inferior a 1145°C.

Cuando la temperatura se encuentra entre 721°C y 1145°C se produce un desdoblamiento de los cristales del metal y aparecen nuevos componentes.

[21] LAJTIN,Yu ; ARZAMASOV,B; Tratamiento químico térmico de los metales; Fig. 27p(65); 1987.

En esta instancia tenemos una solución de hierro y carburo de hierro, sólido en forma de cristales de austenita que al enfriarse se transforma en cristales de hierro (ferrita), cristales de carburo de hierro (cementita) y cristales de composición eutectoide con 0.9% de carbono (perlita).

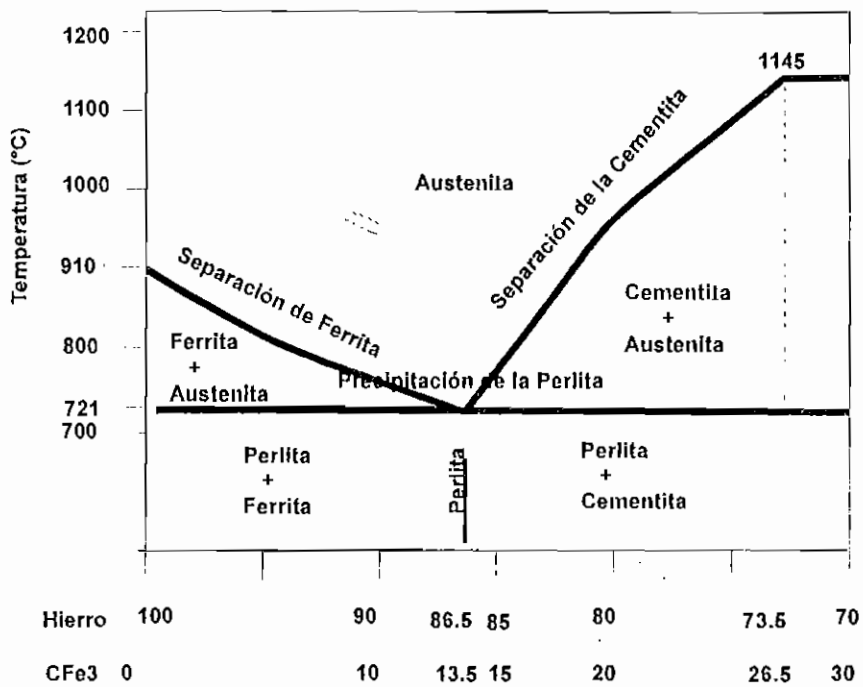



Fig. 2-7. Diagrama hierro-carbono.[22]

A temperatura ambiente los constituyentes fundamentales de estas aleaciones son la ferrita (hierro casi puro) y la cementita (carburo de hierro). El constituyente eutectoide se llama perlita y esta compuesto por láminas paralelas de ferrita y cementita (86.5% de ferrita y 13.5% de cementita).

[22] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; Fig 10 p(14); 1968.

## 2.2.1.2 DIAGRAMA HIERRO - NITROGENO

En general el estudio metalográfico de piezas de acero aleados nitrurados a temperatura corriente (unos 500°C aproximadamente ) presenta dificultades porque son submicroscópicos los nitruros formados.[23]

En el diagrama hierro-nitrógeno se detallan los principales constituyentes que se presentan al nitrurar los aceros a temperaturas mucho más altas que lo normal.

En el diagrama hierro-nitrógeno se señalan las zonas de equilibrio de los constituyentes formados por el hierro y el nitrógeno. Con ayuda del microscopio se observan 2 nitruros: el $Fe_2N$ con 11.3% de nitrógeno y el $Fe_4N$ con 5.8% de $N_2$.

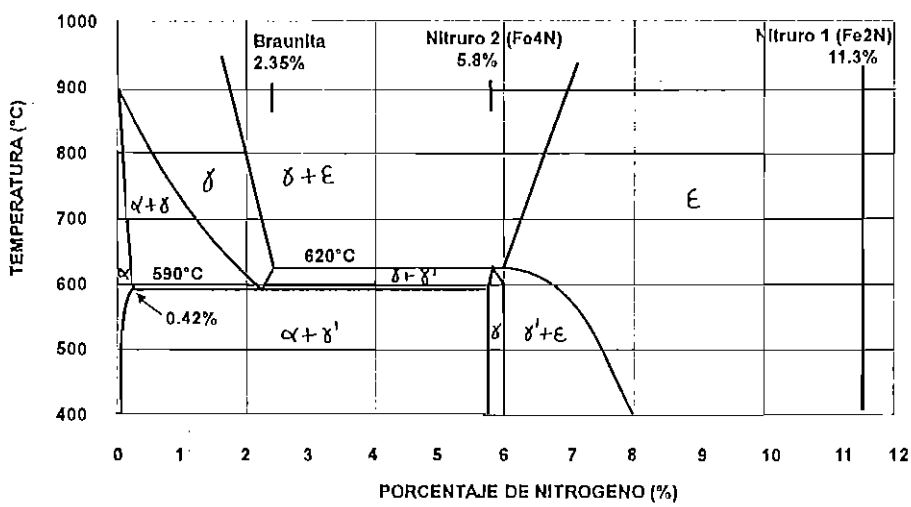



**Fig. 2-8.** Diagrama hierro - nitrógeno.[24]

[23] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; p(388) ; 1968.
[24] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; Fig 368 p(390); 1968.

También se observa la presencia de un eutectoide con 2.35% de $N_2$ conformado por hierro alfa y otro nitruro ($\gamma'$) que se conoce con el nombre de Braunita.

A temperaturas inferiores a 590°C (temperatura eutectoide), la probabilidad que el nitrógeno forme nitruros es muy pequeña y va desde 0.42% ( a 590°C ) hasta 0.001% a la temperatura ambiente.[25]

Normalmente el un hierro con bajo contenido en carbono se presentan las fases $\alpha$ y $\gamma$ pero además en este caso se presenta la fase $\gamma'$ que cristaliza en el sistema cúbico y es estable solo en una zona muy estrecha con un contenido de 5.6 a 5.9 % de nitrógeno aproximadamente, y la fase $\varepsilon$ que cristaliza en el sistema hexagonal y es estable con porcentajes de 8 a 11.3% de nitrógeno.

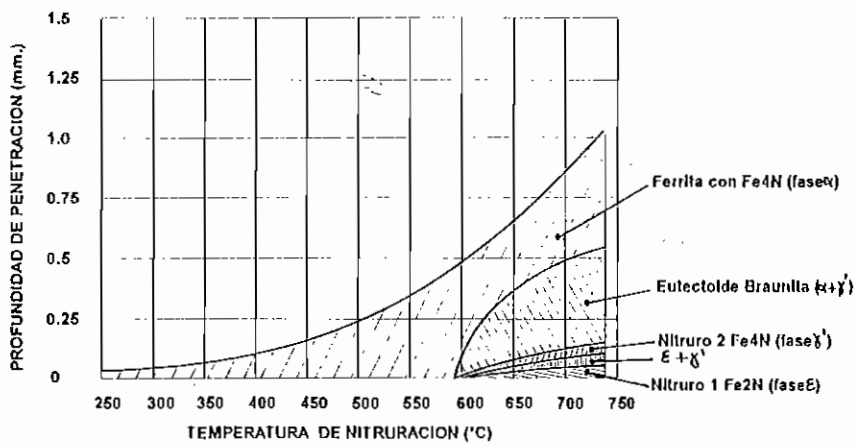



**Fig. 2-9.** Composición de las capas nitruradas en función de la temperatura de nitruración.[26]

[25] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; p(390) ; 1968.
[26] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; Fig 369 p(391); 1968.

En la sección transversal de un hierro nitrurado a 600°C, se puede observar que la capa superficial está formada por: una zona clara de nitruros $Fe_2N$ y $Fe_4N$ , una zona oscura de braunita eutectoide; una de tipo perlítico, con un pequeño porcentaje de nitruro $Fe_4N$ en los espacios intersticiales del hierro alfa, y por último, una zona inalterada.

En la nitruración termoquímica se usan temperaturas de 500°C, inferiores a la eutectoide ( de 590°C) en los que el porcentaje de nitrógeno que se puede disolver en el acero es pequeño. Temperaturas superiores lograrían una penetración mayor del nitrógeno pero las capas nitruradas serían frágiles y sin utilidad práctica.

La penetración del nitrógeno es lenta ( en la nitruración termoquímica a 500°C ) y con 60 horas de nitruración se puede llegar a obtener una capa dura de 0.6 mm de profundidad aproximadamente, el contenido de nitrógeno es inferior al que se alcanzaría con temperaturas elevadas.[27]

### 2.2.2 MECANISMO DE FORMACION DE LA CAPA NITRURADA

Aunque en la actualidad no hay unanimidad absoluta en la interpretación de los fenómenos de endurecimiento que se producen en la nitruración, la teoría mas admitida es la desarrollada por Fry y sus colaboradores, que señalan que la gran dureza de la capa nitrurada se debe a que el nitrógeno o los nitruros que se forman en el proceso originan_

[27] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; p(392) ; 1968.

una fuerte deformación de la red cristalina del acero, situada en la zona periférica de las piezas, que es la causa directa del aumento de la dureza.[28]

Fry sugirió que el endurecimiento de los aceros cromo-aluminio se debe a la formación de nitruros de aleación, los cuales por ser insolubles en la matriz de ferrita son precipitados inmediatamente después de su formación en un estado de gran dispersión, y la deformación que ocasionan en el retículo cristalino es lo que ocasiona el endurecimiento.

Estudiando con ayuda del microscopio la capa periférica de las piezas nitruradas, podemos ver que en general, ésta se forma a su vez por dos capas de aspecto diferente: una exterior blanca (apariencia que adquiere al ser atacada con nital), muy delgada y muy frágil, cuyo espesor suele variar de 0,05 a 0,005 mm, y otra interior de mayor espesor, oscura, que es la verdaderamente importante.[29]

Se ha comprobado que esta última capa esta formada por nitruros de elementos aleados, y en cambio en la exterior blanca, además de los nitruros aleados, aparece también el nitruro de hierro.

La capa blanca es frágil y tiende a astillarse desde la superficie si tiene un espesor que exceda los 0,0127 mm.

---

[28] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; p(393) ; 1968.
[29] AVNER Sydney; Introducción a la Metalurgia Física; p(329) ; 1992.

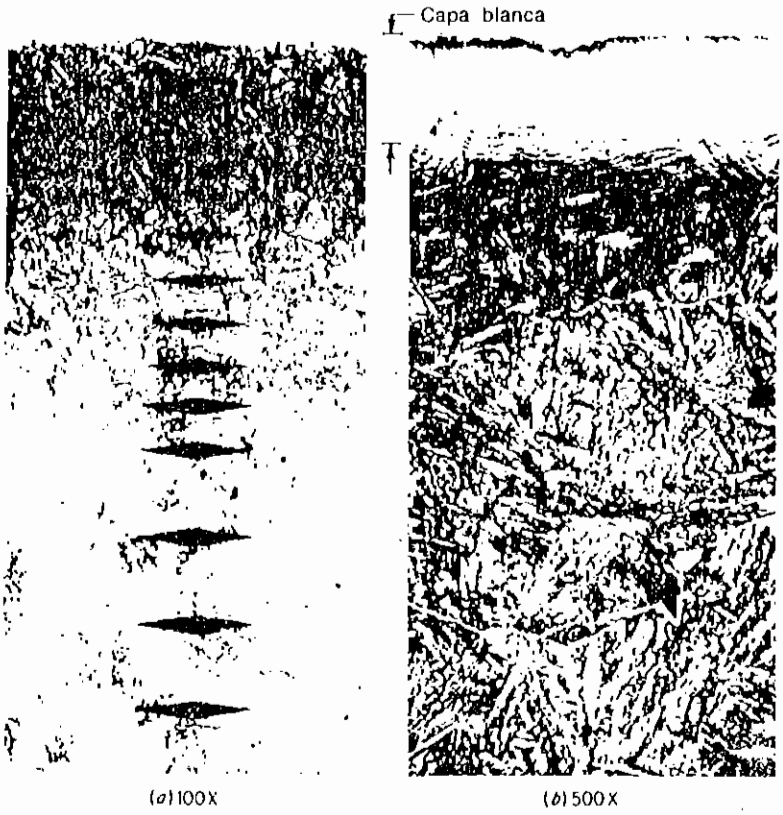



**Fig. 2-10.** Microestructura que muestra una porción externa nitrurada producida por un proceso de una etapa única. Nitrurado durante 48 horas a 975°F(523.8°C) y 30% de disociación de amoníaco. Las formas de diamante son impresiones Knoop de dureza. (Cortesía de The Nitralloy Corporation.). [30]

Las capas blancas más gruesas producidas por el proceso de nitrurado en una sola etapa deben eliminarse porque su presencia es perjudicial; su aparición debe evitarse en cuanto sea posible, lo cual usualmente se consigue con un ligero rectificado ya sea esmerilando o puliendo la superficie después de la nitruración.

[30] AVNER Sydney; Introducción a la Metalurgia Física; Fig 2-6 p(329) ; 1992.

En cambio la capa interna de mayor espesor formada por los nitruros de aluminio, cromo y molibdeno es la de mayor interés en el proceso y la verdaderamente fundamental.[31]

En los procesos industriales las capas periféricas duras se forman cuando a la temperatura de nitruración (que como hemos dicho antes es de unos 500 °C aproximadamente), se pone el nitrógeno atómico en contacto con la superficie del acero.

Entonces el nitrógeno se difunde desde la superficie hacia el interior de las piezas de acero y se forman nitruros submicroscópicos en su zona periférica que, como veremos mas adelante, son los causantes de los aumentos de la dureza.

Es probable que el hierro actúe de portador, formándose primero el nitruro de hierro que es soluble en el hierro alfa (ferrita), el cual en estado de solución reacciona con los elementos aleados que también se encuentran disueltos en el hierro alfa, se precipitan inmediatamente, quedando en forma de partículas submicroscópicas muy dispersas que deforman la red y aumentan la dureza del acero.

Si realizamos el proceso a temperaturas muy próximas a los 500 °C no aparece braunita en la capa superficial, como ocurre cuando el tratamiento se realiza a temperaturas elevadas y como generalmente se venía haciendo hasta que Fry realizó sus investigaciones.

[31] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; p(389); 1968.

El éxito de Fry al nitrurar a 500 °C los aceros aleados se debe a que en las condiciones por él elegidas para operar este proceso, existían en el acero, en solución sólida, elementos aleados capaces de formar nitruros. Al difundirse hacia el interior del nitrógeno, cuando reacciona con esos elementos, se forman y precipitan nitruros de aluminio, cromo, molibdeno y vanadio que endurecen extraordinariamente la capa exterior.

La continua precipitación de nitruros aleados muy dispersos en las superficies de las piezas, llega a saturar el acero formándose una barrera de nitruros que se opone a la penetración del nitrógeno hacia el interior. Una vez saturada la capa periférica, la velocidad de penetración depende de la posibilidad que esta capa transmita el nitrógeno hacia el interior, siendo esa velocidad de penetración lenta, en especial en los aceros aleados.

En la nitruración de aceros aleados la penetración a través de la red cristalina deformada por la presencia de los nitruros es difícil. En cambio, en los aceros al carbono, por disolverse los nitruros de hierro en la ferrita, no deforman la red y la penetración es mas fácil.

## 2.3 TIPOS DE METALES USADOS EN LA NITRURACION

Teóricamente todos los aceros pueden nitrurarse en condiciones

convenientemente elegidas, pero en la práctica se eligen aquello con elementos de aleación capaces de formar nitruros tales como cromo, molibdeno, vanadio, wolframio, titanio, etc, y especialmente de aluminio que es el más poderoso formador de nitruros.[32]

Para la fabricación de piezas nitruradas se emplean aceros con porcentajes variables de carbono que van de 0,2 a 0,6 % , aleados con aluminio, cromo, molibdeno y vanadio; para una elevada resistencia a la tracción el porcentaje de carbono puede llegar a alcanzar el 0,6% .

El contenido en carbono de todos esos aceros, no influye en la dureza, ni en la profundidad de la capa nitrurada, por ello se usan diversos porcentajes, de acuerdo con las características mecánicas que se quieren obtener en el núcleo.[33]

Se debe evitar en el núcleo descarburaciones superficiales (pérdida superficial de carbono), eliminándolas con el uso de mecanizado(en torno, esmeril, etc. ) las que hubiera antes de la nitruración, porque en las zonas donde el porcentaje de carbono es muy bajo, se forman capas con nitruros de hierro que son muy frágiles y pueden ocasionar el desconchado de las capas superficiales.

De los varios elementos aleados que se emplean, el aluminio es el más importante cuando se quieren conseguir las máximas durezas, pero debe ir siempre_

[32] ACEROS DE LLODIO S.A.; Tratamientos térmicos de herramientas de aceros; p(232); 1973.
[33] APRAIZ BARRETRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; p(396); 1968.

acompañado de otros elementos aleados para evitar que las capas nitruradas resulten demasiado frágiles.

| TIPOS DE ACEROS | No. | COMPOSICIONES | | | | | | | | PERIFERIA Dureza Vickers[34] | Corazón templado y revenido a 650° R = kg/mm² |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | C | Si | Mn | Ni | Cr | Al | Mo | V | | |
| Cr - Al - Mo | 1 | 0.5 | 0.35 | 0.65 | -- | 1.6 | 1.1 | 0.2 | -- | 1.100 | 126 |
| Cr - Al - Mo | 2 | 0.4 | 0.35 | 0.65 | -- | 1.6 | 1.1 | 0.2 | -- | 1.100 | 98 |
| Cr - Al - Mo | 3 | 0.3 | 0.35 | 0.65 | -- | 1.6 | 1.1 | 0.2 | -- | 1.100 | 91 |
| Cr - Al - Mo | 4 | 0.2 | 0.35 | 0.65 | -- | 1.6 | 1.1 | 0.2 | -- | 1.100 | 76 |
| Alto en Cr con Mo y V | 5 | 0.4 | 0.3 | 0.5 | 0.3 | 3,-- | -- | 1,-- | 0.25 | 850 | 133 |
| Alto en Cr con Mo y V | 6 | 0.3 | 0.3 | 0.45 | 0.5 | 3,-- | -- | 0.4 | -- | 850 | 100 |
| Alto en Cr con Mo y V | 7 | 0.2 | 0.3 | 0.45 | 0.5 | 3,-- | -- | 0.4 | -- | 850 | 79 |
| Cr - Mo - V | 8 | 0.35 | 0.3 | 0.5 | -- | 2,-- | -- | 0.25 | 0.15 | 750 | 98 |
| Cr - Mo - V | 9 | 0.25 | 0.3 | 0.5 | -- | 2,-- | -- | 0.25 | 0.15 | 750 | 94 |
| Cr - Mo - V | 10 | 0.18 | 0.3 | 0.5 | -- | 2,-- | -- | 0.25 | 0.15 | 750 | 83 |
| Cr - Mo | 11 | 0.3 | 0.3 | 0.6 | 0.6 | 1,-- | -- | 0.25 | -- | 750 | 92 |

**Tabla 2.1**: Composiciones y características mecánicas de diferentes aceros de nitruración.[35]

Se nitruran aceros con bajo porcentaje de aluminio para la construcción de piezas que van a resistir choques importantes, ya que los aceros con alto porcentaje de aluminio son destinados para la construcción de piezas donde se requieren elevadas durezas superficiales.

[34] Vickers= Escala de dureza establecida para los metales. En la escala de dureza Mohs el diamante tiene el valor mas alto de 10, los aceros nitrurados alcanzan valores entre 8 y 9. JASTREVSHI p(264).
[35] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; p(397); 1968.

Los cigüeñales son normalmente construidos en aceros al Cr-Mo, bonificado[36] a 100-125 Kg/mm$^2$ de resistencia. La dureza alcanzada después de la nitruración es más débil, pero la capa nitrurada adquiere una buena resistencia en la zona acero-capa nitrurada.[37]

El molibdeno aumenta también la dureza de la capa exterior, mejora la tenacidad del núcleo y evita la fragilidad que suelen presentar los aceros sin molibdeno al permanecer durante mucho tiempo a temperaturas próximas a los 500 °C.

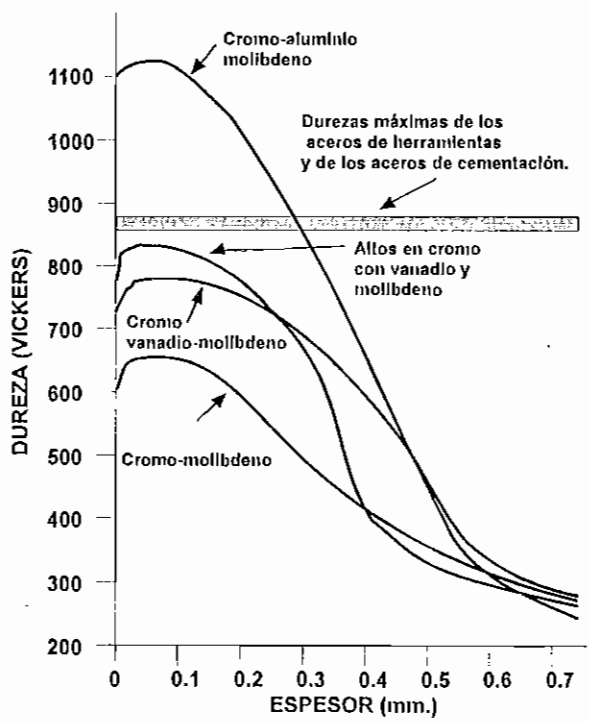



**Fig. 2-11.** Durezas que se obtienen después de la nitruración de diferentes tipos de aceros.[38]

El cromo aumenta la profundidad de la capa dura e incrementa además la

[36] BONIFICACION: Consiste en el temple seguido del revenido. LASHERAS p (454).
[37] PASCUAL, José; Técnica y práctica del tratamiento térmico de los metales férreos; p (61); 1968.
[38] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; Fig. 366 p(386); 1968.

influencia del aluminio y del molibdeno; el vanadio influye decisivamente en la profundidad de nitruración, aumentando el espesor de las capas duras.

Cuanto mas aumenta el porcentaje en Al en el acero original, mas disminuye la velocidad de nitruración. El Ni también es un elemento que retarda la nitruración.

Los grupos de aceros mas usados en la actualidad son:[39]

**1.** Aceros cromo-aluminio-molibdeno con 0,8 a 1,2 % de aluminio, 0,9 a 1,6% de cromo y 0,2% de molibdeno. Con estos aceros se consigue la máxima dureza superficial, que suele oscilar entre 1000 y 1100 Vickers.

**2.** Aceros altos en cromo con molibdeno y vanadio. Aunque con estos aceros solo se consiguen durezas comprendidas entre 800 y 850 Vickers, esas durezas son todavía extraordinarias y las capas nitruradas son mucho mas tenaces que las de los aceros con aluminio. El contenido en cromo es de 3%, el molibdeno de 0,4% a 1% y el vanadio de 0 a 0,25%. Ese elevado porcentaje de cromo aumenta ligeramente la profundidad de la capa nitrurada.

**3.** Cromo - molibdeno - vanadio. Se obtiene durezas de 750 Vickers. El contenido en cromo es de 2%, el molibdeno de 0,25% y el vanadio de 0,15%. La tenacidad de la capa nitrurada es mayor que en los casos anteriores.

[39] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; p(397); 1968.

4. Aceros cromo - molibdeno, que son de menor dureza ( 650 Vickers ), tiene la capa nitrurada más tenaz que los anteriores. Su contenido en cromo es de 1% y el de molibdeno de 1,2%.

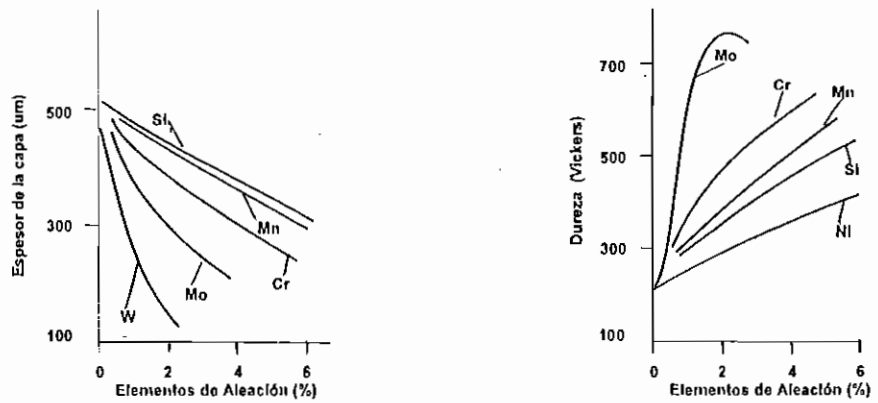



Fig. 2-12. Influencia de los elementos de aleación en la zona de nitruración interna (a), y en la dureza superficial (b). Nitruración a 550°C durante 24 horas. [40]

Debido a que los elementos aleados modifican el diagrama hierro - nitrógeno, es posible emplear con todos estos aceros temperaturas de nitruración un poco mas elevadas que las que corresponden a los aceros al carbono, sin peligro de que aparezca braunita en la capa periférica. La temperatura eutectoide se eleva en algunos aceros aleados hasta 650 °C.

## 2.4 NITRURACION CON GAS

El proceso tecnológico de fabricación de los artículos nitrurados, en una

[40] LAJTIN,Yu ; ARZAMASOV,B; Tratamiento químico térmico de los metales; Fig. 106 p(183); 1987.

atmósfera gaseosa, está constituido por las siguientes etapas : 1. Tratamiento térmico preliminar, 2. Tratamiento mecánico (incluyendo el rectificado), 3. protección de los puntos no sujetos a la nitruración, 4. Nitruración, 5. rectificado definitivo o acabado del artículo de acuerdo con las tolerancias preestablecidas.

La elección de la temperatura de nitruración clásica para las piezas de acero de construcción se determina por los requisitos que se exigen del espesor y dureza de la capa: cuando la dureza es alta y el espesor de la capa es pequeño, se recomienda aplicar una temperatura baja; cuando los espesores son grandes y es alta la dureza, la nitruración se realiza en un régimen de dos etapas: primeramente entre 500 °C y 520 °C y después desde 540 °C a 600 °C, lo que permite reducir bruscamente la duración del proceso.

La elevación de la temperatura de nitruración provoca el aumento del alabeo y las deformaciones.

Para conseguir propiedades óptimas no se debe tratar de obtener un espesor grande de la capa nitrurada.

Cuando el espesor de la capa es grande, no sólo se reduce el límite de fatiga, sino que, además, aumentan las deformaciones (alabeo) de la pieza: Siendo razonable la colocación de las piezas en el horno, con una temperatura y espesor de la capa mínimos, las magnitudes de alabeo y deformación son pequeñas.

## 2.4.1 TRATAMIENTO PRELIMINAR

### 2.4.1.1 PREPARACIÓN DE LAS PIEZAS ANTES DE LA NITRURACIÓN.

*Tratamiento térmico previo.* Se refiere al temple[41] y revenido[42] a temperaturas desde 560 °C hasta 650 °C. Para evitar el alabeo de las piezas, la temperatura de revenido deberá ser de 20 °C a 40 °C más alta que la de nitruración. Se suelen tratar las piezas brutas, pero para las piezas de poca sección (para diámetros inferiores a 60 mm. ) el tratamiento se aplica directamente en las barras laminadas.

Como regla general al nitrurar las piezas fabricadas de aceros de las clases perlítica, martensítica y austenítica (es decir el hierro con diferentes porcentajes de carbono), sus dimensiones aumentan. En relación con esto, antes del tratamiento quimicotérmico se prevé la disminución de las dimensiones geométricas de las piezas.

Para evitar la ferrita libre (por su fragilidad al nitrurarse) en los aceros de nitruración es necesario buscar una estructura más regular. Esta se consigue sometiendo el material a temple seguido de un revenido a temperatura superior a la de la nitruración;

---

[41] TEMPLE : Proceso termoquímico mediante el cual se consigue el endurecimiento de una pieza metálica, esto se logra calentando la pieza metálica hasta determinada temperatura y enfriándola bruscamente en agua o aceite. APRAIZ p(93).

[42] REVENIDO: Los aceros después del temple suelen quedar generalmente demasiado duro y frágiles para determinados usos. Esto se corrige con el revenido que es un tratamiento que consiste en calentar el acero a una temperatura mas baja que su temperatura crítica, enfriándolo luego generalmente al aire y otras veces en aceite o en agua. APRAIZ p (241)

lográndose con este tratamiento reducir la ferrita.[43]

Este tratamiento deberá efectuarse antes que las piezas estén totalmente mecanizadas a medida, con la finalidad de retirar la capa superficial donde el material hubiese podido ser decarburado u oxidado por efecto del tratamiento de bonificación.

*Preparación de las piezas para la nitruración.* Antes de la nitruración la superficie de las piezas debe ser desengrasada por el método electroquímico, mediante el lavado en bencina u otros medios para la eliminación del aceite, de la emulsión y de las distintas impurezas. La película de óxido se elimina con el uso de ácidos como el HCl.

La nitruración de los aceros sin la limpieza preliminar lleva a la disminución del espesor de la capa, a su irregularidad y, como consecuencia, a una dureza heterogénea irregular.

El procedimiento que se sigue en la **nitruración termoquímica** es el siguiente:[44]

**1.** Desbastar las piezas, dejando un excedente de 2 a 3 mm. de las cotas finales.

**2.** Templar y revenir como se ha indicado.

[43] PASCUAL, José; Técnica y práctica del tratamiento térmico de los metales férreos; p (61); 1968.
[44] Iden a referencia 42.

**3.** Mecanizar las piezas a una medida muy próxima a las cotas definitivas

**4.** Efectuar un segundo revenido con la finalidad de eliminar las tensiones del precedente mecanizado

**5.** Terminar de mecanizar las medidas definitivas. Este mecanizado deberá ser ejecutado con pasada bien fina y con la herramienta bien afilada. Evitar las aristas.

**6.** Desengrasar perfectamente las piezas y proteger (de ser necesario), las partes donde no se desee la nitruración.

**7.** Nitrurar.

**8.** En los aceros con elevado porcentaje de Aluminio debe evitarse cualquier rectificado que sea superior a 0,05 mm, con la finalidad de no retirar la parte mas dura de la capa nitrurada. Para otros aceros donde la dureza alcanzada no es tan superior como en los aceros con alto porcentaje de Al evitar de cualquier modo el rectificado (si esto es posible).

***Protección contra la nitruración.*** El método mas usado para proteger las piezas a ciertas áreas de piezas que no se desea nitrurar es mediante el recubrimiento con una película de estaño. El inconveniente de este método es la extensión del estaño por la superficie de la pieza cuando se satura el acero con nitrógeno.

De ser posible, se sumergen las piezas en un baño de aleación compuesto de 60% de plomo y 40% de estaño a 400 °C.[45]

Después de sacar las piezas y dejarlas enfriar, los excedentes se retiran con un cepillo de alambre. También se puede aplicar el estaño con un soldador de cobre o con un soplete de gas.

Para la protección local contra la nitruración de los aceros resistentes a la corrosión se emplean el niquelado químico (de 8 a 10 µm. de espesor) o galvánico (hasta de 30 µm.). Para una protección garantizada es imprescindible tener una capa de níquel densa y de grano fino con un espesor de no menos de 30 µm.[46]

Otras protecciones constan de aleaciones fluidas a base de estaño y de plomo, o bien de glicerina y óxido de estaño, las cuales pueden aplicarse con un pincel o espátula. En esta última, el óxido de estaño es reducido al inicio del tratamiento recubriendo perfectamente la parte a proteger.[47]

El níquel y los inducidos a base de aluminio protegen contra la nitruración. El estañado electrolítico es uno de los mejores medios de protección y es suficiente una película de 0.025 mm. de espesor.[48]

[45] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; p(402); 1968.
[46] LAJTtN,Yu ; ARZAMASOV,B; Tratamiento químico térmico de los metales; Fig. 106 p(203); 1987.
[47] PASCUAL, José; Técnica y práctica del tratamiento térmico de los metales férreos; p (62); 1968.
[48] Idem a referencia 44.

En muchas fábricas, cuando no se requiere tener una frontera entre las superficies nitruradas y no nitrurada, se emplea el vidrio líquido. Antes del recubrimiento las piezas se desengrasan, se lavan con agua caliente, después de los cual se introducen en vidrio líquido. Luego las piezas se secan a temperaturas que van de los 90 a los 120 °C durante un espacio de hora y media. La película de vidrio líquido debe ser transparente, de aspecto vítreo, sin claros ni deterioros mecánicos.[49]

### 2.4.2 PROCESO DE NITRURACION IONICA

Para disminuir el tiempo en que se produce la nitruración clásica (proceso termoquímico) en 2 a 3 veces, se usa la nitruración iónica (tratamiento físico-químico), por lo cual la duración de la nitruración iónica es de 1 a 24 horas.[50]

A pesar de los muchos ensayos que se han hecho hasta el momento, no se ha logrado hasta hoy aumentar de formar sensible la profundidad de penetración con los tiempos aplicados o al revés, alcanzar una disminución del tiempo sin variar la profundidad.

En este sentido se han realizado ensayos por descarga de efluvios consigiéndose desde luego acelerar y aumentar la adsorción de nitrógeno en la zona marginal exterior, pero sin lograr apenas acelerar la penetración del nitrógeno, dado que la velocidad de difusión en el acero es el principal factor determinante de la penetración.

---

[49] Idem a referencia 45.
[50] KOZLOV, Yu; Ciencia de los materiales; p(246); 1986.

El proceso se realiza en atmósfera enrarecida con contenido de nitrógeno ($NH_3$ o $N_2$) conectando a la pieza que se trata al electrodo negativo: el cátodo. Como ánodo puede servir el recipiente de la instalación.

Entre la pieza y el recipiente se excita una descarga luminiscente en la cual los iones del gas bombardean la superficie de la pieza..

La nitruración iónica se la realiza en una descarga luminiscente sobre la superficie de la pieza (cátodo) en una atmósfera de amoníaco, nitrógeno o mezcla de hidrógeno y nitrógeno con una rarificación de 133 a 665 Pa (0.013 a 0.066 atm) y a una tensión de trabajo de 350 a 550 V.[51]

La superposición de campos electrostáticos intensos, que provocan descargas en un gas esta acompañada a diferencia de la nitruración de horno, de la formación de iones positivos de amoníaco o nitrógeno.

Los iones de nitrógeno bajo la acción de la energía del campo electrostático adquieren una velocidad cuyo vector esta dirigido normalmente al cátodo (pieza a tratar).

Durante el bombardeo del cátodo la energía cinética del ión se gasta en calentar la superficie hasta la temperatura de saturación y en el desprendimiento de los electrones y átomos del hierro (pulverización catódica).[52]

[51] LAJTIN,Yu ; ARZAMASOV,B; Tratamiento químico térmico de los metales; p(209); 1987.
[52] Idem a referencia 50.

La nitruración se efectúa a baja presión, necesaria para que la descarga luminiscente se produzca de modo estable.

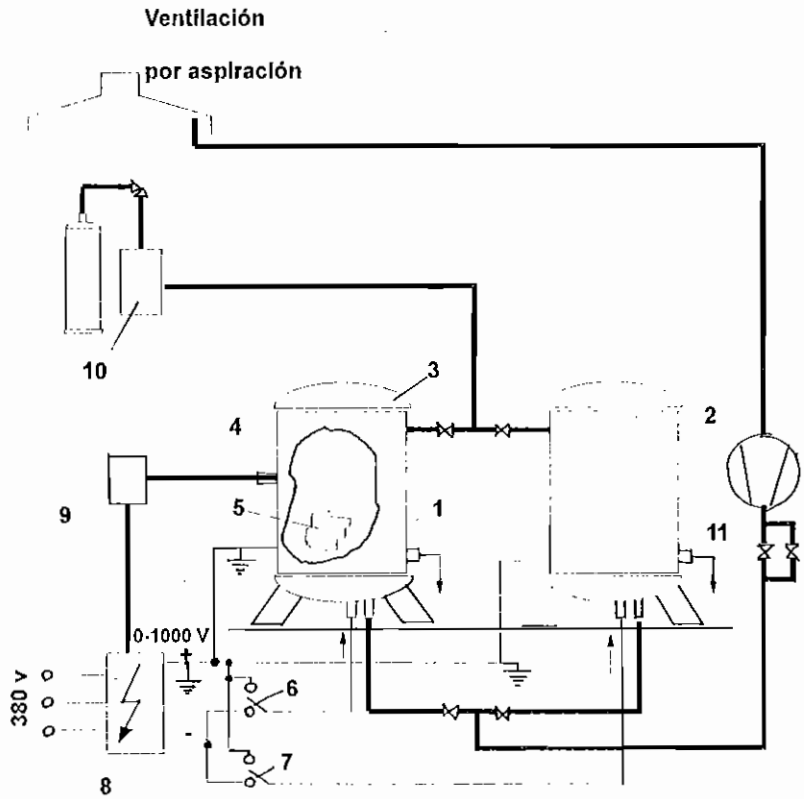



**Fig. 2-13.** Esquema del horno eléctrico de nitruración iónica OKB-1566: 1,2, cámaras de calentamiento; 3, colgador con piezas; 4, termopar; 5, piezas que se están tratando; 6,7, desconectador; 8, fuente de alimentación; 9, bloque de medición y regulación de la temperatura; 10, instalación para preparar gases; 11, bomba de vacío. [53]

El proceso de nitruración iónica se realiza en dos etapas: limpieza de la superficie por medio de la pulverización catódica y nitruración propiamente dicha. Los parámetros eléctricos y de vacío durante la pulverización catódica aseguran la activación de la superficie y la destrucción de las películas de óxido, y en la segunda etapa, el

[53] LAJTIN,Yu ; ARZAMASOV,B; Tratamiento químico térmico de los metales; Fig. 124 p(210); 1987.

calentamiento de la superficie hasta la temperatura de difusión y su saturación con nitrógeno.

La instalación que se usa para este tipo de nitruración, fig 2-13, consta de una cámara de vacío de trabajo, en la que se colocan las piezas (cátodo), de un sistema al vacío, de un dispositivo para la preparación de gases y de bloques de alimentación y de mando.

Los conductores de corriente eléctrica que separan las partes catódica y anódica de la cámara de vacío, están ubicados en el fondo .

El proceso tecnológico de nitruración iónica se reduce a las siguientes operaciones sucesivas:[54]

1. Desengrase de las piezas a tratar.

2. Colocación de las piezas en los dispositivos que, al mismo tiempo, deben servir para la protección contra la nitruración. ( Puesto que en un huelgo de menos de 1mm. la descarga luminiscente no surge, entonces, para excluir la formación de la capa en las superficies apantalladas, es suficiente cubrir las superficies a proteger con una pantalla metálica y dieléctrica y colocar las tuercas, tornillos, casquillos, etc.).

[54] LAJTIN,Yu ; ARZAMASOV,B; Tratamiento químico térmico de los metales; p(210); 1987.

La separación entre la pieza y la pantalla se admite de no más de 0,3 a 0,5mm. (Para el equipo descrito anteriormente).

**3.** Colocación en la cámara del horno de las piezas, del termopar y del testigo para el control de los resultados de la nitruración.

**4.** Limpieza de la superficie de la pieza mediante la pulverización catódica, que se realiza entre 15 a 40 minutos a una tensión de 800 a 1000 voltios. Para calentar las piezas hasta una temperatura de 300 a 400 °C, que asegura una pulverización catódica eficaz de la superficie a tratar, se establece una presión de cerca de 133 Pa (0.0133 atm.) para una carga pequeña y de 13,3 Pa (0.00133 atm.) para una carga grande.

| Marca del Acero | Tempe-ratura °C | Exposición aproximada en horas para obtener una capa de espesor en mm. | | | | | Dureza superfi-cial |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0,15...0,2 | 0,2...0,25 | 0,23...0,3 | 0,3...0,35 | 0,35...0,4 | ( HV ) |
| 40X | 520 | 4...5 | 7...9 | 9...12 | 12...15 | 15...18 | 500...550 |
| 40XA | 520 | 4...5 | 6...8 | 9...12 | 15...18 | ------ | ----- |
| 40XA | 520 | 4...5 | 6...8 | 8...10 | 12...15 | 15...18 | 510...560 |
| 18XT | 530 | 4...5 | 6...8 | 9...12 | 15...18 | ---- | 620...680 |
| 18XT | 550 | 3...4 | 4...5 | 6...8 | 9...12 | 15...18 | 530...600 |
| 30X3M | 530 | 4...5 | 6...8 | 9...12 | 15...18 | ----- | 700...760 |
| 30X3M | 530 | 4...5 | 5...7 | 6...8 | 9...12 | 15...18 | ------- |
| 38X2M10A | 550 | 4...5 | 5...7 | 7...9 | 9...12 | 15...18 | 900...950 |

**TABLA 2.2** :Parámetros tecnológicos fundamentales del proceso de nitruración iónica de las piezas de diferentes aceros.[55]

[55] LAJTtN,Yu ; ARZAMASOV,B; Tratamiento químico térmico de los metales; p(21t); t987.

**5.** Salida a la temperatura de nitruración dada y exposición para obtener el espesor requerido de la capa (tabla 2.2). En el período de saturación la presión se mantiene igual a 400 a 650 Pa (entre 0.039 y 0.0064 atm.) y el potencial de trabajo entre 350 y 550 V. El enfriamiento de las piezas en la cámara del horno se realiza en una rango de 150 a 200 °C a una presión de 13 a 65 Pa (0.001 a 0.0006 atm.) y continúa durante una a dos horas.

E.S. TSIRLIN propuso e introdujo en las fábricas el proceso de nitruración iónica a baja temperatura (350 a 400 °C), en una atmósfera de amoníaco totalmente disociado, de las herramientas (tornillos, fresas, fresas de módulo, brocas, escoriadoras, brochas de tracción, etc) de acero rápido.

Como consecuencia de semejante nitruración se forma una capa nitrurada no frágil de 8 a 20μm de espesor y de una dureza de 1100 a 1250 HV. A la nitruración le sigue el revenido a baja temperatura; esta nitruración eleva 1,5 a dos veces la durabilidad de la herramienta.[56]

Para obtener una capa uniforme en toda la superficie de la piezas, incluyendo las superficies interiores a nitrurar, es necesario que la descarga cubra bien toda la superficie a nitrurar y que el espesor de la parte catódica de la descarga (espesor de la zona de máxima luminiscencia ) sea de 1 a 2 mm.

[56] LAJTIN,Yu ; ARZAMASOV,B; Tratamiento químico térmico de los metales; p(212); 1987.

La nitruración iónica (en comparación con la termoquimica ) tiene las siguientes ventajas:[57]

**1.** Acelera en 1,5 a 2 veces los procesos de difusión

**2.** Permite obtener una capa difusiva de composición y estructura regulables.

**3.** Se caracteriza por deformaciones insignificantes de las piezas y por la alta clase de limpieza de la superficie.

**4.** Da la posibilidad de nitrurar los aceros resistentes a la corrosión y al calor.

**5.** Reduce considerablemente el tiempo total del proceso merced a la disminución del tiempo de calentamiento y enfriamiento de la carga.

**6.** Posee gran rendimiento económico, eleva el coeficiente de aprovechamiento de la energía eléctrica, no es tóxica y responde a los requerimientos de defensa del medio ambiente.

La nitruración iónica se aplica para el tratamiento de las fundiciones y de diferentes aceros y aleaciones: de construcción y de herramientas.

[57] Idem a referencia 54.

## 2.5 CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DE LAS PIEZAS NITRURADAS

### 2.5.1 CARACTERISTICAS MECANICAS

La resistencia del núcleo central de las piezas nitruradas suele variar de 75 a 135 kg/mm$^2$ llegándose en algunas ocasiones hasta 150 kg/mm$^2$.[58]

Cuando interesan resistencias muy elevadas, hay que usar aceros con 0,4 a 0,5 % de carbono, revenidos a 550 °C, y para bajas resistencias aceros de 0,2 a 0,3% de carbono con revenidos a 700 °C.

Se ha señalado ya que la dureza superficial es variable y depende de la composición. Con los aceros al aluminio se alcanzan durezas de 1000 a 1100 Vickers. Con los aceros altos en cromo 800 a 850 Vickers y con los cromo-molibdeno y cromo-vanadio, 650 a 800 Vickers.[59]

Numerosos investigadores han observado que las piezas nitruradas tienen una excepcional resistencia a la fatiga con poca sensibilidad a la influencia de las entallas. Esto parece que se debe a ciertos esfuerzos de compresión que se desarrollan en la superficie de las piezas, como consecuencia del aumento de volumen que experimentan después de la nitruración.

[58] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los accros; p(398); 1968.
[59] Iden a referencia 56.

## 2.5.2 DEFORMACIONES Y DEFECTOS DE LAS PIEZAS NITRURADAS

### 2.5.2.1 DEFORMACIONES

Generalmente en las piezas nitruradas interesa una gran exactitud de medidas; algunas veces surgen dificultades porque las tensiones que se crean con el mecanismo de la nitruración suelen originar deformaciones de las piezas. Este inconveniente puede evitarse dándoles un recocido de estabilización.

Normalmente sólo se produce una ligera hinchazón, debido a la variación de densidad de la capa nitrurada, que es más débil que la correspondiente a la del metal base. [60]

La importancia de este ligero aumento de volumen dependerá de la forma de las piezas, de la temperatura del proceso de nitruración y de la duración del tratamiento.

Para eliminar dentro de lo posible ese aumento de volumen, conviene que la estructura de las piezas que van a ser nitruradas no tenga ferrita libre, debiendo de evitarse también cualquier descarburación superficial, pues además de dar lugar a capas nitruradas frágiles, originan dilataciones anormales en las piezas.

[60] PASCUAL, José; Técnica y práctica del tratamiento térmico de los metales férreos; p (66); 1968.

En piezas macizas, con capas nitruradas de 0,7 mm de espesor son normales, después de la nitruración, aumentos de diámetro de 0,05 mm. En las piezas huecas, las variaciones de volumen dependen del espesor de las paredes.

Con piezas de 70 mm de diámetro, templadas y revenidas, mecanizadas y sometidas a continuación a un tratamiento de estabilización a 600 °C, se obtuvieron los siguientes resultados después de ser nitruradas durante 72 horas a 500 °C:

| Espesor de la pared (mm.) | Aumento del diámetro interior (mm.) | Aumento del diámetro exterior (mm.) |
|---|---|---|
| 5 | 0,08 | 0,13 |
| 10 | 0,03 | 0,09 |
| 20 | 0,01 | 0,06 |

**TABLA 2.3**: Deformaciones de piezas nitruradas obtenidas experimentalmente[61]

Cuando las piezas son de forma complicada el mejor método de conocer o prever las dilataciones que experimentan, es nitrurar una o dos piezas y medir las dilataciones que aparecen.

Deben evitarse en lo posible en las piezas nitruradas, las aristas vivas, porque en los vértices de los ángulos muy agudos, se forman capas nitruradas que no poseen un núcleo central de suficiente espesor y tenacidad para servirles de soporte y se agrietan y desprenden con facilidad.

[61] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; p(405); 1968.

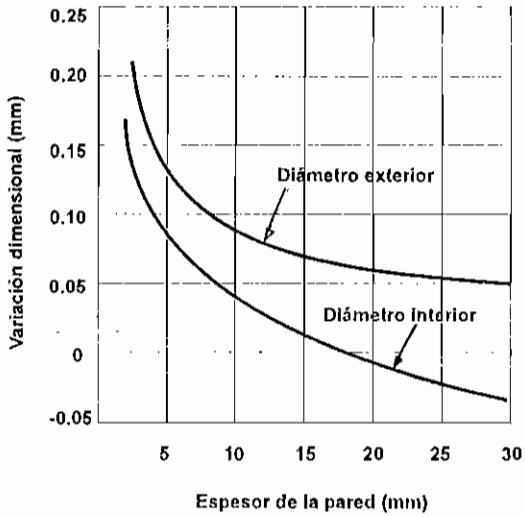



**Fig. 2-14.** Variaciones dimensionales en un cilindro de 70 mm de diámetro exterior y diferentes espesores nitrurados a 525°C durante 72 horas. [62]

Para las piezas delgadas o de poca sección es más acentuado: Cuando la forma de las piezas delicadas no es regular la presión de la capa nitrurada puede provocar ligeros aleteos.

En la figura 2-14 se muestran las variaciones dimensionales del espesor de la pared de cilindros huecos de 70 mm de diámetro exterior nitrurado a 525°C durante 72 horas. Para espesores delgados de la pared de los cilindros se ha determinado que la variación de las dimensiones se asemejan a las causadas por la cementación o el temple.[63]

Las temperaturas elevadas causan mayor deformación que nitrurando a_

[62] ACEROS DE LLODIO S.A.; Tratamientos térmicos de herramientas de aceros; Fig. 99 p(244); 1973.
[63] ACEROS DE LLODIO S.A.; Tratamientos térmicos de herramientas de aceros; p(244); 1973.

temperaturas mínimas para alcanzar un mismo espesor.[64]

### 2.5.2.2 DEFECTOS

En el proceso de nitruración por gas pueden surgir los siguientes defectos:[65]

**1.** La deformación y el alabeo son tan grandes cuanto más alta es la temperatura del proceso y más gruesa la capa nitrurada. La deformación y el alabeo de las piezas nitruradas están condicionados por la naturaleza de la capa nitrurada, composición del acero, estructura irregular de las piezas, protección asimétrica y de baja calidad contra la saturación, alteración de la tecnología de tratamiento térmico previo y por una colocación incorrecta de las piezas durante el tratamiento.

El aumento del volumen específico de la superficie durante la nitruración va acompañada de un incremento de las dimensiones geométricas de las piezas. Las dimensiones de la pieza aumenta por término medio un 4 a 6%, en dependencia del espesor de la capa nitrurada, lo cual se debe tener en cuenta al asignar los sobreespesores.

**2.** La fragilidad y la descamación de la capa se determinan por la pureza y calidad del metal, por la desviación respecto a los regímenes de nitruración y de rectificado. En los lugares de inclusiones no metálicas, con cascarillas, grietas y otros_

[64] PASCUAL, José; Técnica y práctica del tratamiento térmico de los metales férreos; p (66); 1968.
[65] LAJTIN,Yu ; ARZAMASOV,B; Tratamiento químico térmico de los metales; p(221); 1987.

defectos de continuidad se observa el hinchamiento de la capa provocado por una gran concentración de nitrógeno. Con un rectificado esta capa se desmenuza.

Los defectos de nitruración y rectificado aparecen en la superficie durante el proceso de rectificado o bruñido y tienen el siguiente aspecto: de descamación de "películas" finas de la capa nitrurada en dirección del avance de la piedra rectificadora; de lesión de la superficie en gran escala por una "erupción" menuda, o sea, de desmenuzamientos puntuales (hasta 0.05 mm de profundidad), que surgen durante las operaciones de acabado; de una red densa de grietas diminutas.

La zona frágil superficial puede ser eliminada por el rectificado a una profundidad de 10 a 50 µm sin reducir la dureza. Para disminuir la descamación se deben observar los condiciones óptimas del rectificado.

**3.** La dureza baja e irregular de la capa nitrurada esta condicionada por la elevación de la temperatura de nitruración, un alto grado de disociación del nitrógeno, interrupciones en el suministro del gas y por el incumplimiento de la tecnología del tratamiento térmico previo.

La dureza irregular de la superficie dentro de los límites de una sola pieza está provocada por la presencia en la superficie de endurecimiento de trazas de estaño o vidrio líquido (después de la nitruración parcial ), por un desengrase insuficiente de las piezas y por heterogeneidad granular de la estructura del acero. La partes de grano fino_

tienen una dureza más alta que las partes de grano grueso.

**4.** Un espesor insuficiente de la capa está provocada por el descenso de la temperatura del proceso, y por la reducción de la exposición. Para corregir este defecto en el espesor de la capa se recurre a la nitruración repetida.

### 2.5.3 CONTROL DE CALIDAD DE LAS PIEZAS NITRURADAS

La calidad de la nitruración se comprueba en la muestra testigo y directamente en las piezas. Se controlan el espesor de la capa, la dureza superficial, el alabeo y la deformación, las dimensiones y la calidad de la superficie. Las muestras testigos se someten el tratamiento térmico y se fabrican del mismo acero que las piezas a nitrurar.

Después de la nitruración las piezas se someten al examen visual. La superficie nitrurada debe ser de color gris mate, pero si se presentan manchas azuladas evidentemente se ha registrado ingreso de aire en el equipo durante la nitruración.[66]

En todas las piezas se comprueba la ausencia de descamaciones, cizallamientos y agrietamientos, sobre todo a los largo de los bordes agudos, con un aumento de x15 a x30. El control de la dureza se realiza en las muestras testigos y directamente en las piezas mediante medidores de dureza del tipo Vickers que es la_

[66] PASCUAL, José; Técnica y práctica del tratamiento térmico de los metales férreos; p (64); 1968.

máquina que permite medir con acierto la dureza de la capa nitrurada.

El espesor de la capa difusiva se controla en las muestras testigos examinando al microscopio con un aumento de x100 a x200.

Sumergiendo las piezas en una solución de sulfato de cobre éstas no deben ser recubiertas de cobre, si están correctamente nitruradas.

### 2.5.4 ESPESOR DE LA CAPA NITRURADA

El espesor de la capa nitrurada no debe ser exagerado. Actualmente la tendencia es mas bien que sea disminuido, con la finalidad de bajar la gran fragilidad que presenta, sobre todo en el caso de los aceros con elevado porcentaje de Al (1%) y donde el módulo de elasticidad de la capa nitrurada es elevada.[67]

Una fuerte capa de nitruración es, corrientemente, la causa de anomalías mas o menos graves (deformaciones y fragilidad).

La temperatura óptima de nitruración termoquímica es a los 525 °C, si se sobrepasa de este valor se produce un descenso de la dureza y con ello un aumento de la fragilidad de la capa nitrurada.

[67] PASCUAL, José; Técnica y práctica del tratamiento térmico de los metales férreos; p (65); 1968.

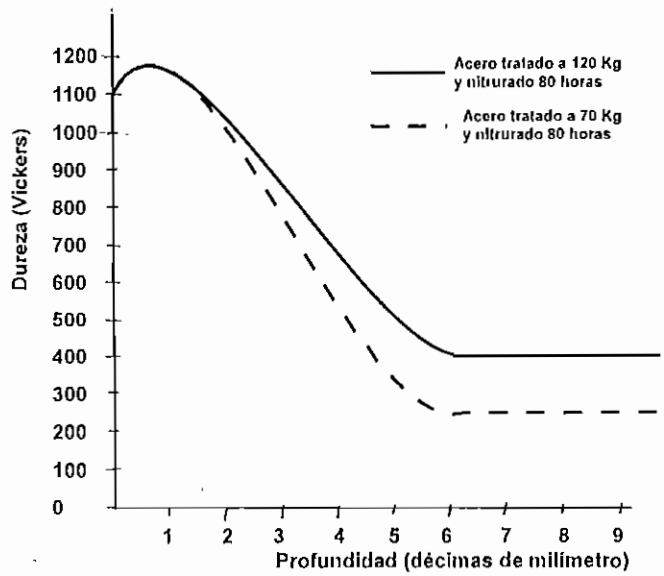



**Fig. 2-15.** Disminución de la dureza en la capa nitrurada al aumentar el espesor de la capa nitrurada. [68]

La disminución de la dureza en la capa nitrurada varía según sean los aceros para un mismo ciclo de nitruración. La fig 2-15 muestra esta variación en dos aceros de distinta composición , tratados a 120 y 70 Kilos por $mm^2$, respectivamente.

La profundidad de las capa nitruradas que se obtienen normalmente en la industria varían de 0.2 a 0.7 mm y su espesor depende principalmente de la temperatura y la duración del tratamiento (fig. 2-16). A 500 °C con 25 horas se consiguen 0,2 mm de espesor de capa y con ochenta horas 0,68 mm. aproximadamente.

Para reducir la duración se han propuesto cambios en los procesos usando temperaturas de 510 °C durante unas horas y después elevándola a 535-550 °C, pero los_

[68] PASCUAL, José; Técnica y práctica del tratamiento térmico de los metales férreos; Fig.11.2 p (65); 1968.

resultados obtenidos no han tenido mucha aceptación.

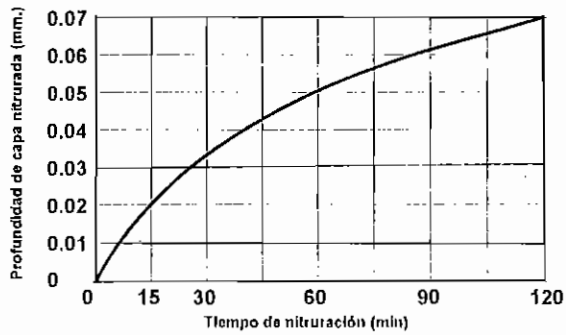



**Fig. 2-16.** Tiempo de nitruración que se necesita para conseguir una determinada profundidad nitrurada. Temperatura de nitruración: 540°C (tomado de ¨ Degussa¨. Manual de la técnica de temple con sales ). [69]

En la práctica, el espesor de la capa nitrurada no sobrepasa los 0.8 mm, salvo casos particulares. Generalmente la nitruración queda limitada a 0.5 mm de espesor.

## 2.6 VENTAJAS Y APLICACIONES

Las propiedades que mas se destacan de las piezas que han sido sometidas a un proceso de nitruración son las siguientes:[70]

*1. GRAN DUREZA.* Después de la nitruración, se consiguen durezas_

[69] STÜDEMAN Hans; Tratamiento térmico de los aceros; Fig. 107 p(234) ; 1980.
[70] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; p(386); 1968.

elevadísimas que no se consiguen por otros procedimientos de endurecimiento superficial. Las piezas nitruradas llegan a tener durezas comprendidas entre los 650 y los 1100 Vickers, según la composición del acero.

Cuando interesa que la capa dura sea de gran tenacidad, conviene usar aceros, que después de la nitruración queden con durezas relativamente bajas ( 650 a 850 vickers), porque las capas nitruradas de máxima dureza tiene menor tenacidad.

*2. GRAN RESISTENCIA A LA CORROSION.* Los aceros, después de la nitruración, resisten mejor la acción corrosiva del agua dulce, agua salada, vapor o atmósferas húmedas que los aceros ordinarios, y por eso, este proceso es muy utilizado para las piezas que deben sufrir la acción de ciertos agentes corrosivos.

Su resistencia al ataque por metales o aleaciones fundidas de aluminio, cobre, etc., es mucho mayor que la de los aceros ordinarios. En el caso que interese la máxima resistencia a la corrosión, no deben rectificarse las piezas después de nitruradas. Resiste bien a las soluciones alcalinas.[71]

*3. AUSENCIA DE DEFORMACIONES.* Como en el tratamiento de nitruración, no es necesario enfriar las piezas rápidamente, desde altas temperaturas, en agua o aceite, se evitan los graves inconvenientes de los enfriamientos rápidos, que pueden dar origen a deformaciones importantes.

[71] PASCUAL, José; Técnica y práctica del tratamiento térmico de los metales férreos; p (67); 1968.

*4. ENDURECIMIENTO EXCLUSIVO DE DETERMINADAS SUPERFICIES DE LAS PIEZAS.* Durante la nitruración se pueden proteger perfectamente las superficies de las piezas que no se desea endurecer, aunque sean de formas complicadas e irregulares, dejando libres para nitrurar exclusivamente las zonas que deben quedar duras.

*5. RETENCION DE LAS DUREZAS A TEMPERATURAS ELEVADAS.* Las capas nitruradas conservan gran dureza hasta los 500 °C especialmente cuando la duración del calentamiento no es muy prolongada.

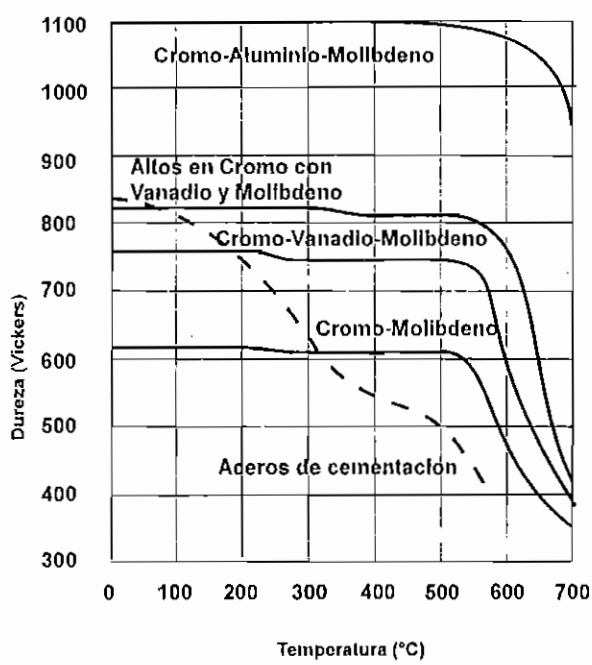



**Fig. 2-17.** Dureza de los aceros nitrurados después de permanecer una hora a diversas temperaturas. Los ensayos se realizan a la temperatura ambiente. [72]

[72] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; Fig. 367 p(387); 1968.

En la figura 2-17 se puede apreciar al comportamiento de varios aceros y su dureza después de haber permanecido a diversas temperaturas durante una hora.

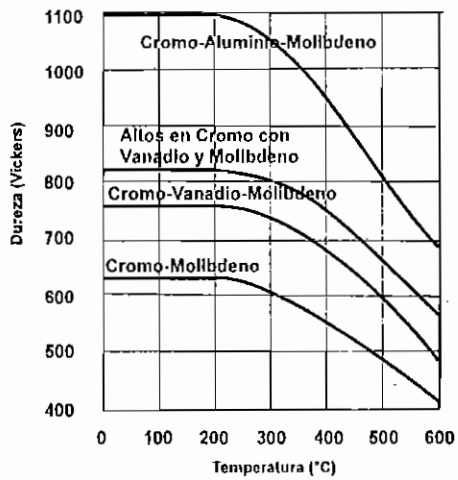



**Fig. 2-18.** Dureza a elevada temperatura de los aceros nitrurados. Los ensayos se realizan a alta temperatura. [73]

En la figura 2-18 se describe la dureza de los aceros nitrurados a temperaturas variables desde 0 a 600 °C. Se observa que las piezas nitruradas mantienen a temperaturas elevadas durezas superiores a las que se consiguen con otros procedimientos de endurecimiento de la capa periférica, como la cementación, temple superficial, etc., ya que la capa dura, obtenida por estos métodos, pierde dureza muy rápidamente a partir de los 200 °C.

Esta propiedad es muy interesante para órganos de máquinas en los que pueden presentarse sobrecalentamientos accidentales, por falta de lubrificación.

[73] Idem a referencia 69.

*6. RESISTENCIA AL DESGASTE.* Se pueden realizar muy ventajosamente frotamientos directos de la capa nitrurada sobre aleaciones blancas (bielas), sobre otras capas nitruradas, sobre bronce al Ni, o bien sobre aceros inoxidables. La resistencia al desgaste es muy buena, pero lo es menos que la que ofrece el cromado duro.[74]

La nitruración se usa no solamente para endurecer superficialmente las piezas de maquinaria, como cigueñales, etc sino también para herramientas como brocas, cuyo rendimiento mejora notablemente.

La nitruración puede ser aplicada a piezas de: automóviles, tractores, máquinas - herramientas agrícolas, textiles y otros elementos que van a soportar: desgaste, cavitación, cargas cíclicas y corrosión.

[74] Idem a referencia 68.

## CONCLUSIONES

**1.** Aditivos, impurezas u otros elementos ayudan o pueden obstaculizar el proceso de nitruración en la superficie del metal. El oxígeno al deteriorar la superficie impide la formación de nitruros; en cambio el hidrógeno favorece la nitruración, en tanto en cuanto no haya oxidación.

**2.** En la nitruración termoquímica se usan temperaturas de unos 500°C inferiores a la eutectoide (590 °C). Un aumento posterior en la temperatura producirá mayor penetración de nitrógeno pero el resultado serian capas frágiles sin uso practico.

**3.** Vista de perfil al microscopio, la capa nitrurada debe componerse de dos regiones: una exterior blanca, delgada y frágil que tiene espesores comprendidos entre 0.5 a 0.005 mm. y la otra oscura que puede llegar a tener un espesor de 0.6 mm.

**4.** Al saturarse el acero con una capa de nitruros que se depositan en la superficie, esta capa hace de barrera que impide la penetración del nitrógeno al interior del metal, la velocidad de difusión dependerá de la posibilidad que la capa de nitruros transmita el nitrógeno hacia el interior, siendo esa velocidad de penetración alta, especialmente en los aceros aleados.

**5.** En los aceros al carbono, la penetración a través de la red cristalina es mas fácil debido a la disolución de los nitruros de hierro en la fase de la ferrita.

6. Antes de llevar a cabo la nitruración se debe limpiar la superficie mediante el lavado en bencina para eliminar rastros de aceite. El oxido se retira con ácidos como el HCl.

7. Para proteger de la nitruración termoquímica ciertas áreas, se usa el niquelado químico o galvánico; aleaciones de estaño y plomo o de glicerina y oxido de estaño.

8. Para obtener una capa uniforme en toda la superficie de las piezas, incluyendo las superficies a nitrurar, se requiere que la descarga se produzca uniformemente sobre estas áreas y que el espesor de la parte catódica de la descarga (espesor de la zona de máxima luminiscencia) sea de 1 a 2 mm.

9. En las piezas a nitrurar deben evitarse las aristas vivas ya que en los vértices de los ángulos muy agudos, se producen capas nitruradas con un núcleo con bajo espesor y tenacidad para servir de soporte y por ello se desprenden con facilidad.

10. Sumergiendo las piezas en una solución de sulfato de cobre, estas no deben ser recubiertas de cobre si están correctamente nitruradas.

# CAPITULO 3

# ENSAYOS DE NITRURACION CON DESCARGA LUMINISCENTE

## 3.1 TUBO DE DESCARGAS

Para estudiar la tecnología de la descarga luminiscente, en un medio formado por nitrógeno, mediante un campo eléctrico provocado por dos electrodos sometidos a un alto voltaje, fue necesario construir un equipo que se lo llamará tubo de descargas luminiscentes, similar a un equipo que se tiene el laboratorio de alto voltaje de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, pero con un diseño que permite cierta versatilidad en la manipulación del tipo de electrodos, cambio de las probetas, variación de la distancia interelectródica, ingreso y salida del gas, así como la visualización del fenómeno que se esta produciendo en su interior debido a su pared cilíndrica transparente.

### 3.1.1 DISEÑO Y CONSTRUCCION

Las premisas fundamentales para la elaboración de la cámara para descargas luminiscentes fueron las siguientes:

* El equipo debía permitir la visualización del fenómeno que se iba a realizar en su interior.

* El material que conformaría el equipo debía soportar presiones de hasta 5 atmósferas o inferior a la presión atmosférica, en caso de ser ello necesario para realizar las descargas luminiscentes.

* El equipo debía presentar facilidades para su desmonte, con el fin de variar las

distancias entre los electrodos y el tipo de electrodos a usarse sin necesidad de desarmar todo el equipo.

* Los materiales que conformarían el equipo debían soportar alta tensión eléctrica sin sufrir por ello daños.

* Se dejaría una distancia apropiada entre los componentes energizados para evitar que se produzca arco eléctrico entre estos puntos.

* Facilidad de acoplamiento con los elementos de alto voltaje existentes en el laboratorio. Como resistencias, capacitores, diodos y conexiones con el cilindro que contiene nitrógeno.

* Construcción sólida que garantice el uso del equipo mismo por mucho tiempo.

Para la elaboración de este equipo, se procedió a la búsqueda de los materiales más adecuados para construirlo.

Se escogió inicialmente el acrílico para confeccionar el tubo transparente y con ello visualizalizar la descarga luminiscente aunque luego se debió cambiar a otro material debido a que el primer tubo construido no soportó las presiones que se registraron en su interior y se destruyó.

Para confeccionar el tubo de acrílico fue necesario un molde en madera que se adapte a la forma y dimensiones requeridas.

Completan el equipo dos tapas de aluminio: una inferior que permite el ingreso y la salida del gas, y la superior que permite el cambio de los electrodos sin desmontar todo el equipo.

Se escogió el aluminio, por ser éste un material macizo, fácil de trabajar, liviano, resistente a la corrosión, conductor y porque es relativamente fácil de conseguir. Se adquirió el aluminio en el laboratorio de fundiciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica, para lo cual se trazaron los primeros planos del equipo que se iba a construir con el fin de determinar la cantidad y la forma de las piezas de aluminio en bruto que se requerían para ser trabajadas hasta tomar la forma final.

Debido a la excentricidad del molde de madera, el tubo de acrílico tomó la forma del mismo, al someter el equipo a pruebas con aire a presión interior para conseguir hermetismo, al llegar a una presión de 3 atmósferas el tubo de acrílico no soportó esta condición rompiéndose el material en varios pedazos. A esta conclusión se llegó luego de analizar la forma de los pedazos de acrílico que quedaron del tubo.

Por ello se buscó otro material transparente que reemplace al acrílico y se optó por la resina de poliester por su resistencia la presión, transparencia y sobretodo por la facilidad que presentaba para trabajarla en condiciones normales (presión y temperatura ambiental), dándole la forma deseada con el uso de un molde elaborado especialmente para construir un tubo cilíndrico de las dimensiones deseadas.

El equipo que se diseñó y finalmente se construyó consta de un tubo transparente elaborado a base de resina de poliester, confeccionado especialmente para el equipo de

descargas. Este tubo por su transparencia y resistencia mecánica permite visualizar la descarga luminiscente con presiones de hasta 3 atmósferas (este valor puede ser mas alto) y con presiones de vacío de 0.5 mmHg ($10^{-3}$ atmósferas).

Para obtener mayor información acerca de la construcción del cilindro transparente, así como los diagramas de la cámara de descargas # 3 ver Anexo 1.

A la tapa superior de aluminio se acopla un tornillo cuya cabeza tiene las dimensiones adecuadas para acoplarse al equipo de pruebas de alto voltaje, y su rosca le permite acoplarse a la tapa superior de aluminio del equipo, además de sujetar (mediante dos tornillos "prisioneros" ) al portaelectrodos que es una barra de acero cromado que en su extremo inferior puede alojar a diversos tipos de electrodos.

Al portaelectrodos, en el laboratorio de metalurgia extractiva trataron de darle un revestimiento de cobre para mejorar su capacidad de conducción, pero éste tratamiento no surgió efecto por ello se envió a cromar esta y otras piezas del equipo.

En la tapa inferior existe un agujero roscado donde se aloja la barra que sujeta al electrodo portaprobetas que hace las veces de cátodo. Esta pieza de acero cromado, en su parte inferior es roscada y en su parte superior tiene un agujero para alojar la espiga del portaprobetas.

Las piezas a las cuales se les da el tratamiento se les denomina probetas, por ello el nombre del dispositivo que las contiene. El portaprobetas esta hecho en aluminio, tiene la

forma de un electrodo plano pero con un diseño especial ya que su borde se asemeja a un perfil Rogowski con el fin de distribuir uniformemente el campo sobre la pieza a tratar.

Las probetas se alojan en un canal que esconde las caras inferior y laterales y deja al descubierto únicamente la cara superior que es la que recibirá el tratamiento. Las probetas se sujetan al electrodo mediante dos piezas de aluminio, con un tornillo cada una, que al ajustarse contra el portaprobetas inmovilizan a las probetas.

El portaprobetas entonces se presenta como un electrodo plano, con una cara de la probeta al descubierto, y con un perfil especial para distribuir la descarga luminiscente uniformemente en toda su superficie de la probeta.

La tapa inferior del equipo tiene una llave para el ingreso del gas y otra para la salida del mismo; las llaves son de media vuelta, llamadas también de esfera porque este elemento con un agujero a través controla la circulación del gas. Entre las llaves se ha colocado un medidor de presión positiva para el gas que se aloja en el interior del equipo.

Las piezas de aluminio, que forman la base y la tapa del equipo, se componen a su vez de dos piezas separadas las cuales se unen mediante pernos de cabeza hexagonal (Allen) para conformar las piezas definitivas. Esto es así ya que los canales de las piezas de aluminio en los cuales se aloja el tubo de poliester no se los puede confeccionar de otra forma.

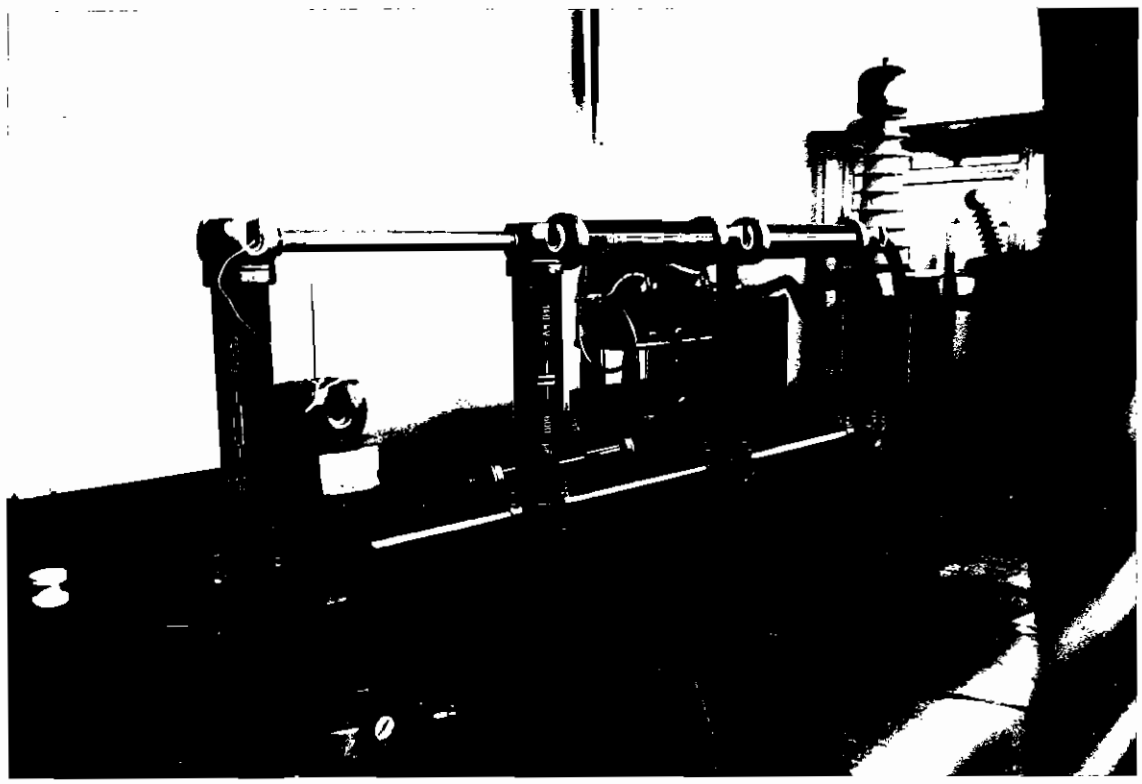


**Foto 3-1.** Equipo de descargas en funcionamiento

El tubo se sujeta a cada pieza de aluminio mediante aros de metal que ingresan en canales realizados en la superficie del tubo de poliester, en la parte inferior y en la superior del tubo. A cada aro de metal se soldaron seis piezas con sendos agujeros donde ingresan los espárragos (tornillos sin cabeza) que están unidos a cada pieza de aluminio y que se ajustan con el uso de arandelas y tuercas.

En los canales de cada tapa donde ingresa el tubo transparente se colocaron empaques de caucho planos y circulares para lograr un mejor sellado y evitar el ingreso de aire durante el proceso (al trabajar con nitrógeno a baja presión) o que escape nitrógeno al ambiente si se trabaja con presiones mayores a la atmosférica.

## 3.2 SELECCION DE CONDICIONES DE OPERACION

Además de construir el equipo de descargas para el tratamiento superficial de las probetas, se usaron dos tubos mas de descarga con el fin de conocer los valores de voltaje, presión y corriente para producir la descarga luminiscente, es decir las condiciones de la descarga.

El primer equipo para descargas que lo denominaremos tubo de descargas # 1[1] consta de dos electrodos de cobre planos y paralelos separados una distancia de 4 mm que se conectan por fuera con varillas de cobre conductoras por medio de las cuales se energiza el conjunto.

Para el ingreso y salida del gas se dispone de tres tubos de vidrio transversales, uno de los cuales fue sellado por ser innecesario para las pruebas realizadas.

El segundo equipo se lo mandó a confeccionar de forma similar a los tubos de vidrio que conforman las luminarias para publicidad y que producen luminiscencias en diferentes colores dependiendo de los gases solos o en combinación que contienen, como son Ar, Ne, He, etc.

Este tubo contiene dos electrodos de acero A-36 del mismo material con el cual se confeccionaron las probetas. Estos electrodos se confeccionaron a base de aquellos que se usan en los tubos de neón y tienen un diseño especial que permite encañonar la descarga_

[1] Facilitado por el Dr. Celso Moya Profesor de la Facultad de Ciencias de la Escuela Politécnica Nacional.

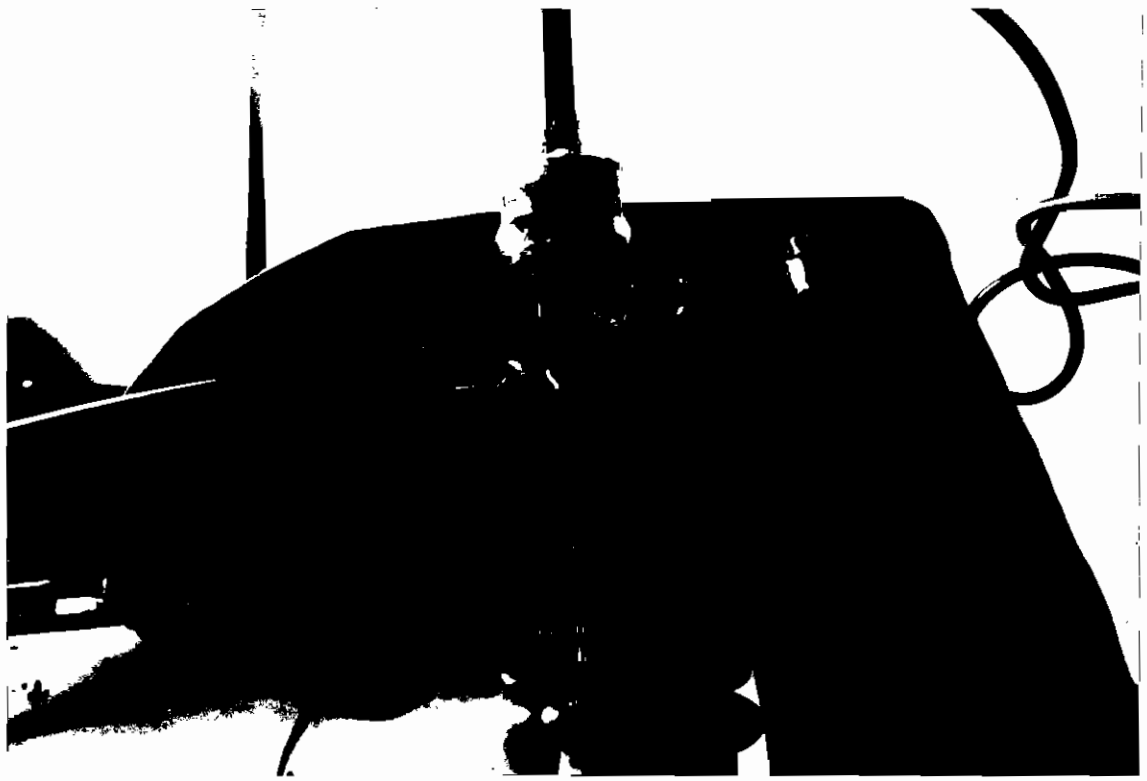


**Foto 3-2** Tubo de descargas #1

hacia el otro electrodo. La distancia interelectródica es de 52.2 cm.

El nitrógeno que se usó fue adquirido en Aga, catalogado como de tipo industrial, su composición es la siguiente: 99.5% de N2, 0.5% de vapor de agua, aire y oxígeno.

Para controlar la presión en los equipos para descargas descritos se dispone en el laboratorio de alto voltaje de una bomba inglesa marca Edwards de alto vacío; además se debió construir una cámara de pre-vacío para controlar mejor las presiones bajas.

Esta cámara de pre-vacío se construyó a base de un tubo de hierro de 1.4 m. de

longitud y 2 pulgadas de diámetro; en sus extremos se colocaron tapones de metal para hermetizarlo, dos llaves para vacío, y dos vacuómetros (medidores de vacío).

**Foto 3-3** Tubo de descargas # 2

Las llaves son especiales para vacío y se las colocó en el tubo para regular la presión que sale hacia la bomba y desde la cámara de descargas hacia la cámara de pre-vacío; uno de los medidores de vacío tiene una escala que mide desde 760 a 0 mmHg y el otro, de mayor exactitud, para presiones desde 40 mmHg hasta 0 mmHg.

La energía para el funcionamiento de las cámaras de descargas inicialmente la entrego una fuente marca Fluke que funciona con el voltaje de la red y entrega altos voltajes continuos. Los selectores del voltaje de salida son en: décimas, unidades,

decenas, centenas y miles de voltios por ello se puede variar el voltaje desde 0.1 V hasta 11.000 V.

En el manual de este equipo de alto voltaje se informa que dispone de un relé de protección que actúa cuando la corriente de salida del mismo llega a ser 12 mA., por ello a la salida del equipo se debe colocar una resistencia con el fin de controlar la corriente. Esta resistencia se compone de varias resistencias de alto voltaje en serie, colocadas dentro de un tubo de metal, que suman un valor de 1.092 MΩ.

Para conectar la bomba de vacío al tubo de descargas se usaron mangueras y acoplamientos en diferentes espesores, de tal forma que la salida de la bomba es de 7/8 de pulgada y la entrada al tubo de vidrio es de 1/4 de pulgada.

Se realizaron las conexiones necesarias entre la bomba de vacío y este tubo de descargas y entre el cilindro con nitrógeno y el tubo de descargas. En el laboratorio de petróleos de la Facultad de Ingeniería Química se consiguieron dos llaves de vidrio para ingresar y sacar el gas hacia y desde el tubo de descargas.

Para dar inicio a las pruebas se tomaron las precauciones necesarias debido a que se trabajaría con alto voltaje, para ello se destinó un área específica para realizar las pruebas, se limpiaron los diversos componentes, se revisaron los contactos y aislamientos, se comprobó el voltaje de salida del equipo de alto voltaje, se chequeó el funcionamiento de las válvulas del cilindro de nitrógeno, etc.

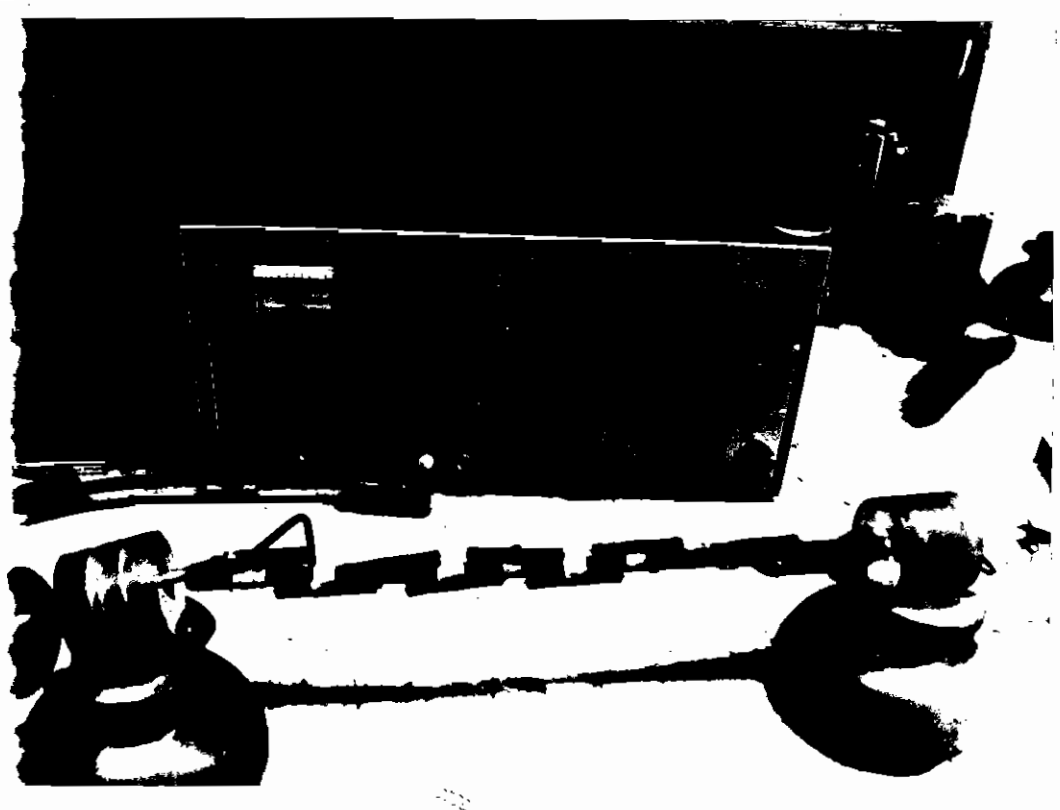


**Foto 3-4** Equipo Fluke para altos voltajes continuos.

En el numeral 1.3.4.1 se habló sobre la importancia que tiene la forma de los electrodos en el voltaje al cual se produce la descarga luminiscente.

Para ello se determinó las formas más representativas de los electrodos para producir la descarga luminiscente. En una tesis de grado[2] se encontraron formas y dimensiones de electrodos que habían sido ensayados, se tomaron sus dimensiones y se adaptaron a las dimensiones del portaelectrodos del tubo de descargas #3.

[2] HUACA PINCHAO, José María; Análisis de métodos para cuantificación del efecto corona; Tesis; Abril de 1983; Quito-Ecuador.

En la Foto 3-5 se pueden observar los electrodos que se usaron para este tubo de descargas.

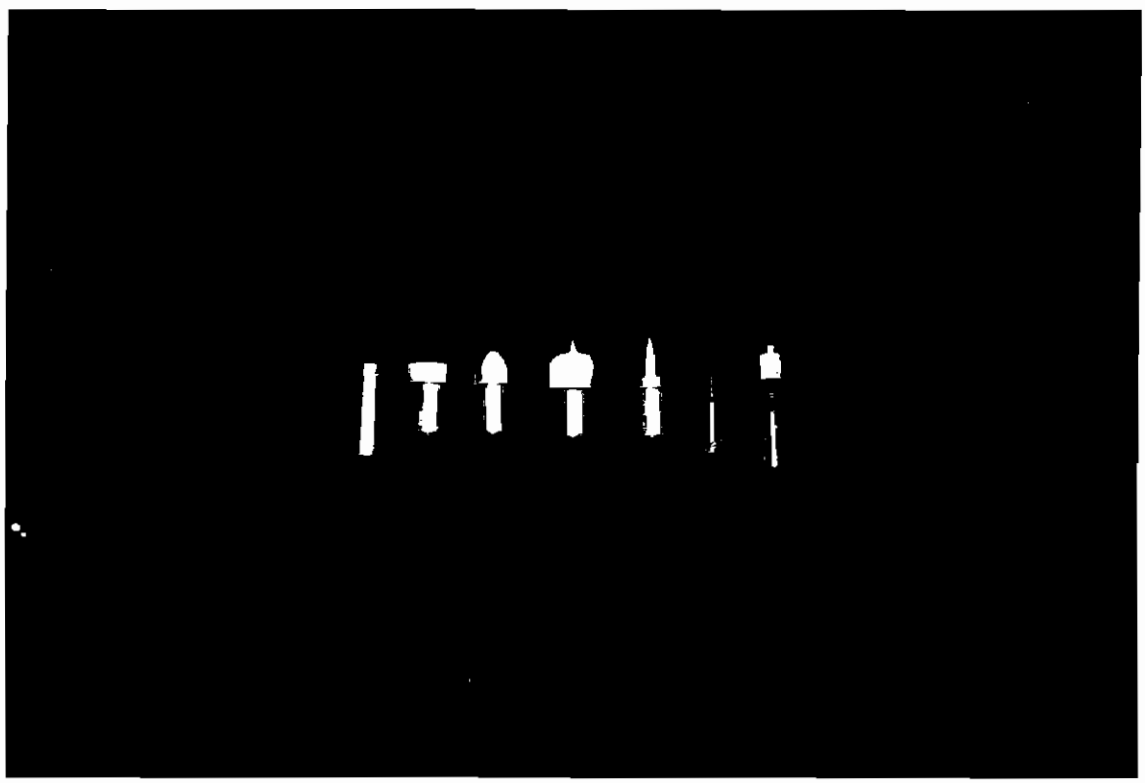


**Foto 3-5** Electrodos para el tubo de descarga # 3.

Para el tubo de descargas # 2 se construyeron dos electrodos similares a los usados en los tubos de neón para producir la descarga luminiscente; su diseño permite encañonar la descarga hacia el otro electrodo.

Con estas precauciones se dio inicio a los experimentos con cada uno de los tres tubos que consecutivamente se utilizaron.

### 3.2.1 LEY DE PASCHEN EN NITROGENO MOLECULAR

Luego de establecer las condiciones de operación se conectó el equipo de descargas #1 para encontrar los valores en voltaje y presión con los que se producía la descarga.

Se fue subiendo paulatinamente el voltaje hasta que la luminiscencia se produjo a 950 V con una presión de 17 mmHg; se redujo el voltaje y con un valor de 700 V se apagó la descarga. Nuevamente se elevó el voltaje hasta 1300 V con ello se elevo la corriente hasta 12 mA y actuó el relé de corriente del equipo.

Cuando esto ocurre se debe desconectar la salida de alto voltaje y esperar unos 10 segundos luego de lo cual se enciende una luz en el equipo que indica que se puede encender la salida de alto voltaje para continuar con el experimento.

Debido a que en el tubo de descargas #1, las dos placas circulares no eran totalmente planas ya que tenían ciertas irregularidades, la descarga no se mantuvo estática en un solo punto, constantemente se desplazó comenzando como un punto de luz en el ánodo y proyectándose en forma de cono hacia el cátodo.

Al desconectar la energía y volverla a conectar inmediatamente, se observó que la luminiscencia daba inicio incluso a un voltaje menor que el inicial, esto se debió seguramente a que el volumen ionizado que se mantiene al desconectar la fuente de energía volverla a conectar, la descarga encuentra un medio mas idóneo para producirse con un menor valor del campo eléctrico.

...continúa en la página 124.

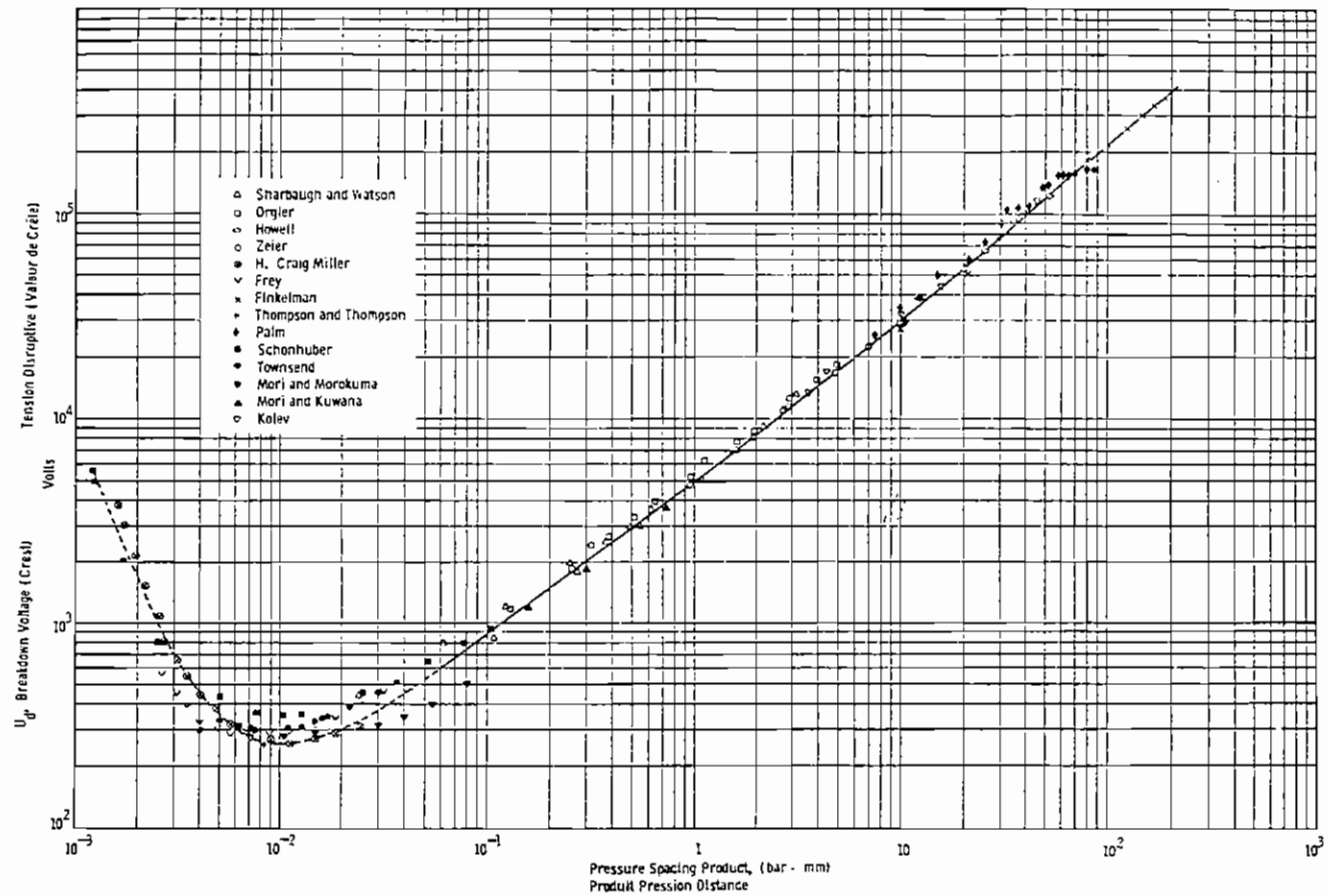



**Figura 3-1.** Curva de Paschen para el nitrógeno en escala log-log. Temperatura 25 °C.

En el literal 1.3.4 se abordó el tema de la Ley de Paschen, la cual expresa que el voltaje de ruptura de un gas es directamente proporcional al producto p.d y no depende de la presión o la distancia independientemente.

La figura 3-1 muestra la curva de Paschen para el nitrógeno molecular donde se ve que el mínimo de la curva registra un valor de aproximadamente 260 V.

Esta gráfica fue tomada de la revista Electra #32 editada por la CIGRE[3]. Fueron varios los investigadores que, trabajando independientemente, llegaron a determinar los datos y mediante ajuste de curvas trazaron la gráfica; para mayor informacion sobre la forma en que se realizaron los experimentos para trazar la curva de Paschen referirse al Anexo 2.

Debido a las diferencias en la presión y la temperatura con los que esos datos fueron conseguidos en comparación con las condiciones con las cuales se trabajó en el laboratorio se tomaron datos para conformar una curva de Paschen experimental.

Estos datos se consiguieron con el uso del tubo de descargas # 2 . Para ello se llenó el tubo con nitrógeno hasta una presión de 2 atm.; inmediatamente se procedió a encender la bomba de vacío para extraer el nitrógeno.

Como la distancia interelectródica es mayor que para el caso del tubo de descargas #1 ya que en este caso se tiene una distancia de 52.2 cm, por ello se podía prever que el_

... continúa en la página 127.

[3] ELECTRA, Conferencia Internacional sobre Grandes Sistemas Eléctricos en Alto Voltaje. CIGRÉ No.32 Enero 1974. Paris.

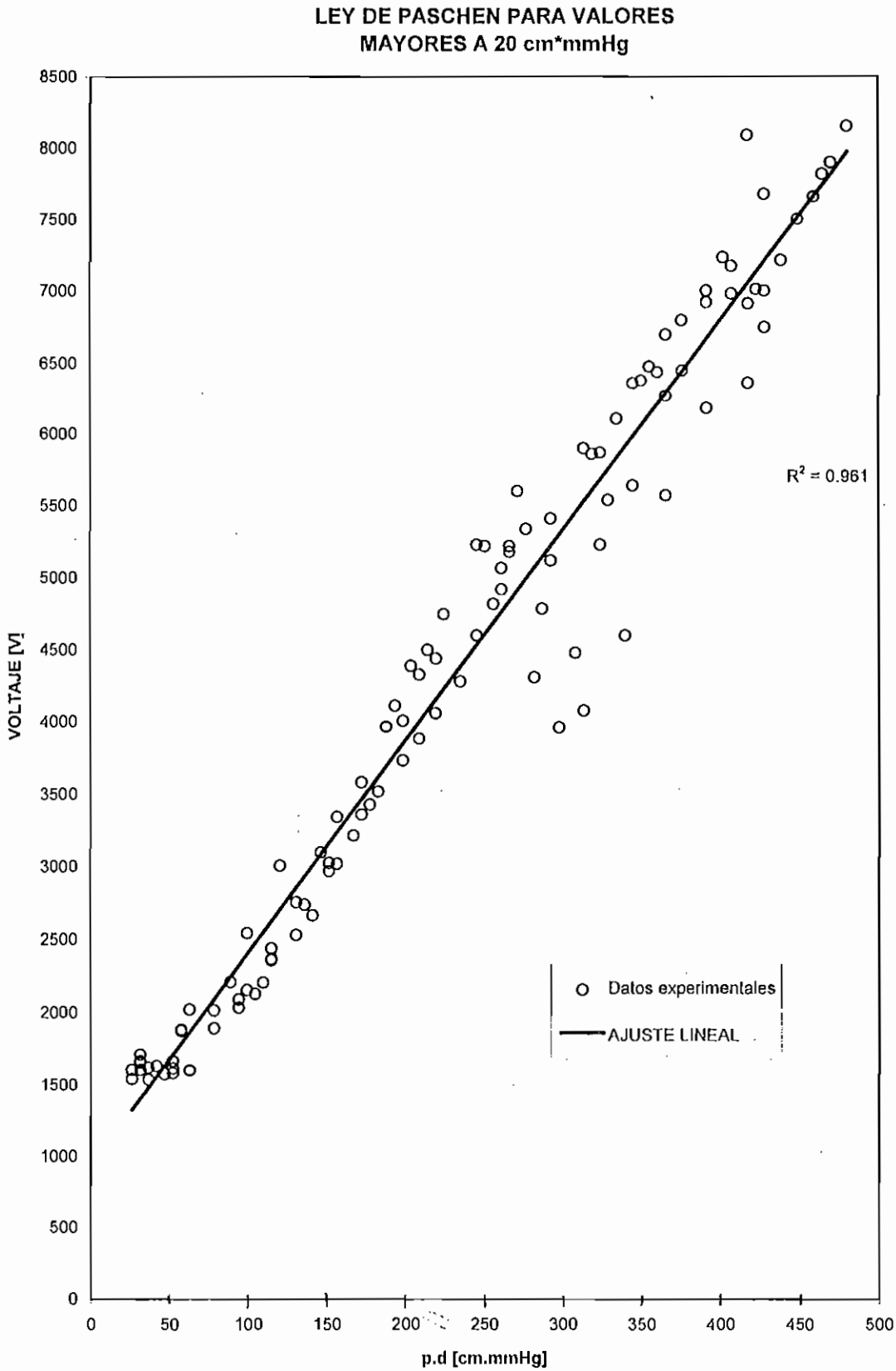



**Figura 3-2.** Curva de Paschen experimental para valores mayores a 20 cm*mmHg.

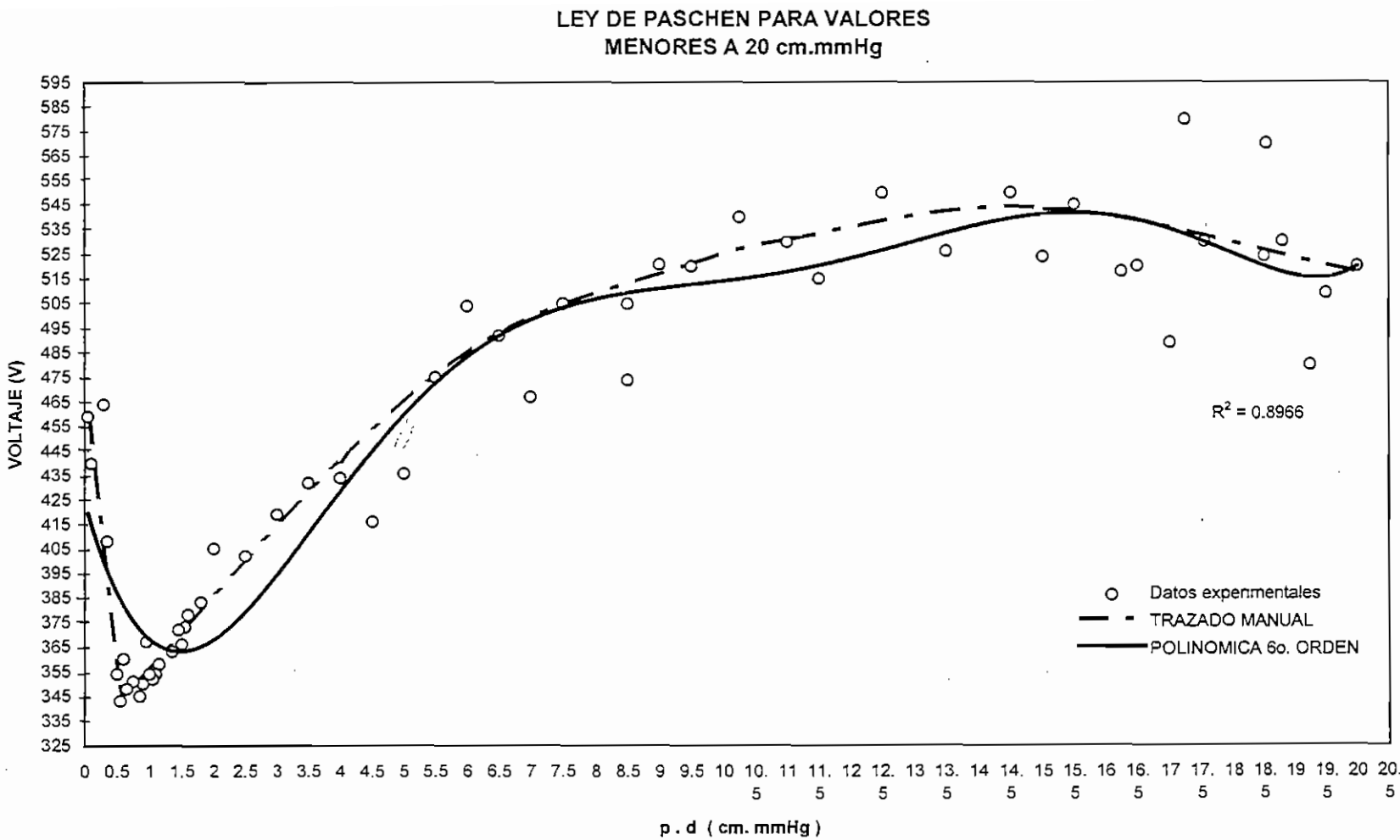



**Figura 3-3.** Curva de Paschen experimental para valores menores a 20 cm*mmHg.

voltaje al cual se producía la descarga luminiscente seria a un voltaje mayor que para el tubo de descargas #1.

En la figura 3-2 (Ley de Paschen) se puede observar que para los datos que se obtuvieron, luego de hacer con estos un ajuste de curvas, se observa que la relación entre el voltaje de ruptura y el producto de la presión por la distancia responde mejor a una relación lineal.

Esta es una buena guía que establece los valores del voltaje con los cuales se produce la descarga luminiscente para una presión y una distancia interelectródica dadas.

En el apéndice se muestran las tablas que contienen los valores que se obtuvieron para trazar las gráficas que se muestran en las siguientes páginas.

La curva de Paschen obtenida experimentalmente (figura 3-2) tiene sus limitaciones ya que no se consiguieron datos para valores de p.d menores a 20 cm.mmHg esto se debió a que la distancia entre los electrodos del tubo de descargas # 2 era fija ( 52.2 cm ) y la mínima presión que se obtuvo con la bomba de vacío fue de 0.6 mmHg.

Para conocer la curva de Paschen completa, se debió recurrir al equipo de descargas # 3 con el cual se podía cubrir un rango más amplio de valores debido a la facilidad de variar la distancia entre los electrodos por un lado y a manipular en forma permanente el voltaje. El resultado se muestra en la figura # 3-3.

### 3.2.2 SELECCION Y CONTROL DE VOLTAJES Y CORRIENTES

Una vez establecidos los valores para la curva de Paschen se puede escoger las condiciones de voltaje y de corriente para producir la descarga luminiscente.

Los primeros experimentos se llevaron a cabo con el uso del tubo de descargas # 2 energizado por la fuente (Fluke) de alto voltaje continuo con lo cual la descarga luminiscente se produjo con voltajes inferiores a 2000 voltios con presiones inferiores a 2 mmHg.

Con una presión de 1.5 mmHg y una resistencia limitadora de 614 kΩ. se inició la descarga a los 1625 V, el voltaje a los terminales de la resistencia limitadora fue de 2320, por tanto la corriente con la que comenzaba a producirse la descarga estaba en ( 2320 - 1625)V / 614 kΩ = 1.13 mA.

Las magnitudes del voltaje fueron medidas con la ayuda de un multímetro marca Fluke (true rms) que permite obtener valores confiables de los voltajes medidos.

Se pudo determinar que al variar la resistencia limitadora, el voltaje de encendido de la descarga luminiscente se producía casi al mismo valor, para comprobar esto se obtuvieron datos para determinar la relación entre la variación de la resistencia limitadora y el voltaje al cual inicia la descarga luminiscente.

Con estos datos se establecieron dos curvas: la una determina la variación del voltaje al cual comienza la descarga luminiscente en función de la resistencia limitadora y

la otra indica como varía la corriente que circula por el tubo de descargas en función del incremento de la resistencia limitadora.

En las figuras 3-4 y 3-5 se puede apreciar la variación del voltaje y la corriente, al inicio de la descarga luminiscente, al variar la resistencia limitadora.

En la figura 3-6 se traza la caracteristica voltaje - corriente para una descarga no autosostenida; la corriente toma valores en el orden de los microamperios y aún no se produce la luminiscencia. En esta gráfica se puede observar la inestabilidad de la descarga y únicamente demuestra el caracter aleatorio en el inicio de la descarga.

En cambio en la figura 3-7 se nota la conducción a través del gas en una descarga autosostenida. El cambio violento de los valores entre la gráfica anterior que muestra una descarga no autosostenida y esta grafica se debe a que la fuente de alto voltaje entrega valores en forma discontinua y ello hace que se no se mantenga uniformidad en el incremento del voltaje.

El tubo de descargas # 2 también permitió identificar las distintas regiones de claridad y oscuridad que se producen en la descarga luminiscente al variar las condiciones de presión y voltaje. En el numeral 3.2.3. se detallan los resultados que se obtuvieron.

Luego de obtener varios datos con el tubo de descargas # 2 que permitieron obtener relaciones entre el voltaje, la corriente y la variación de la resistencia limitadora, así como la Ley de Paschen, se procedió a usar el equipo de descargas #3 , una vez que se hubo_

...continua en ta página 133.

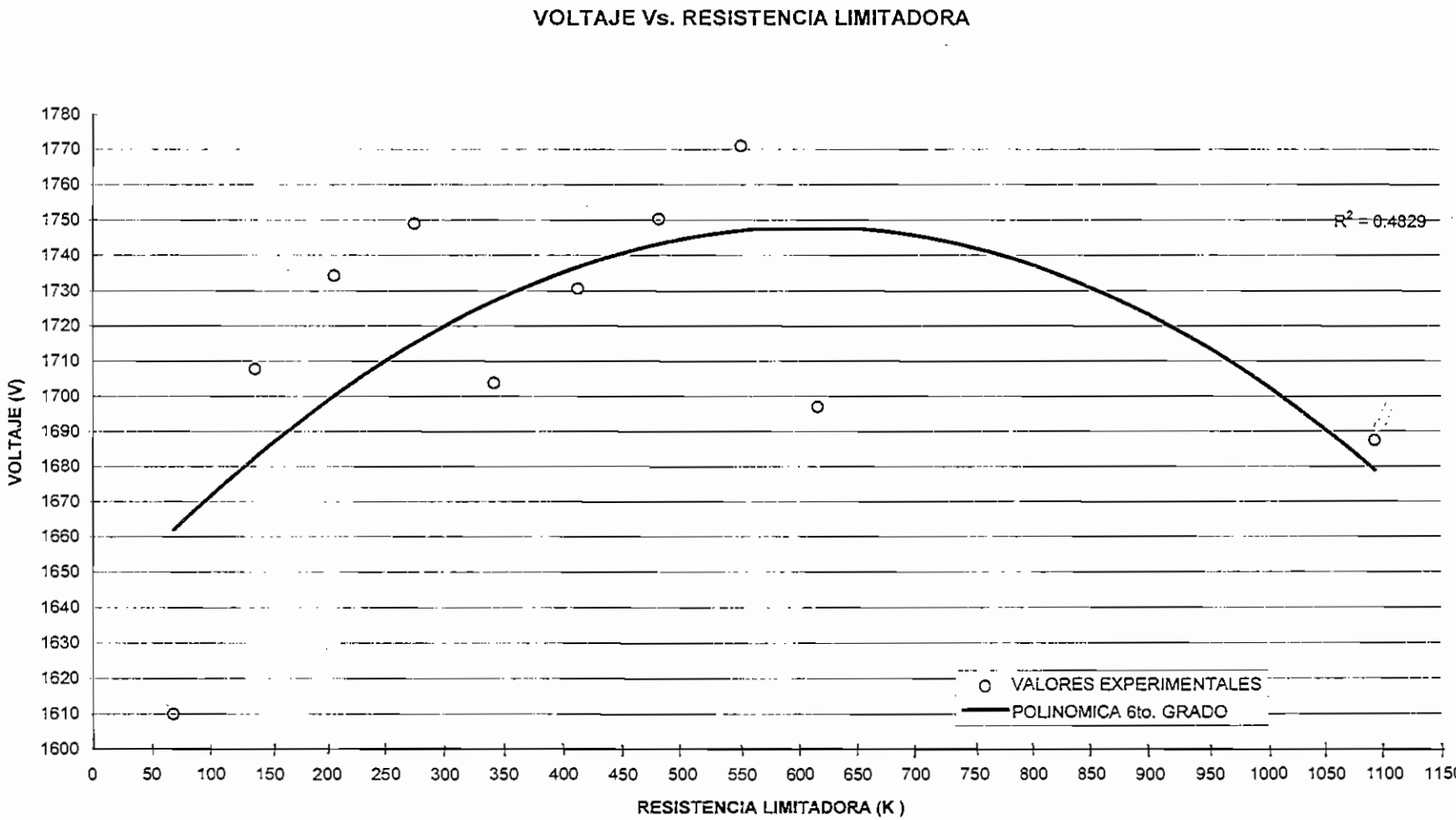



**Figura 3-4.** Voltaje al cual se inicia la descarga luminiscente al variar la resistencia externa

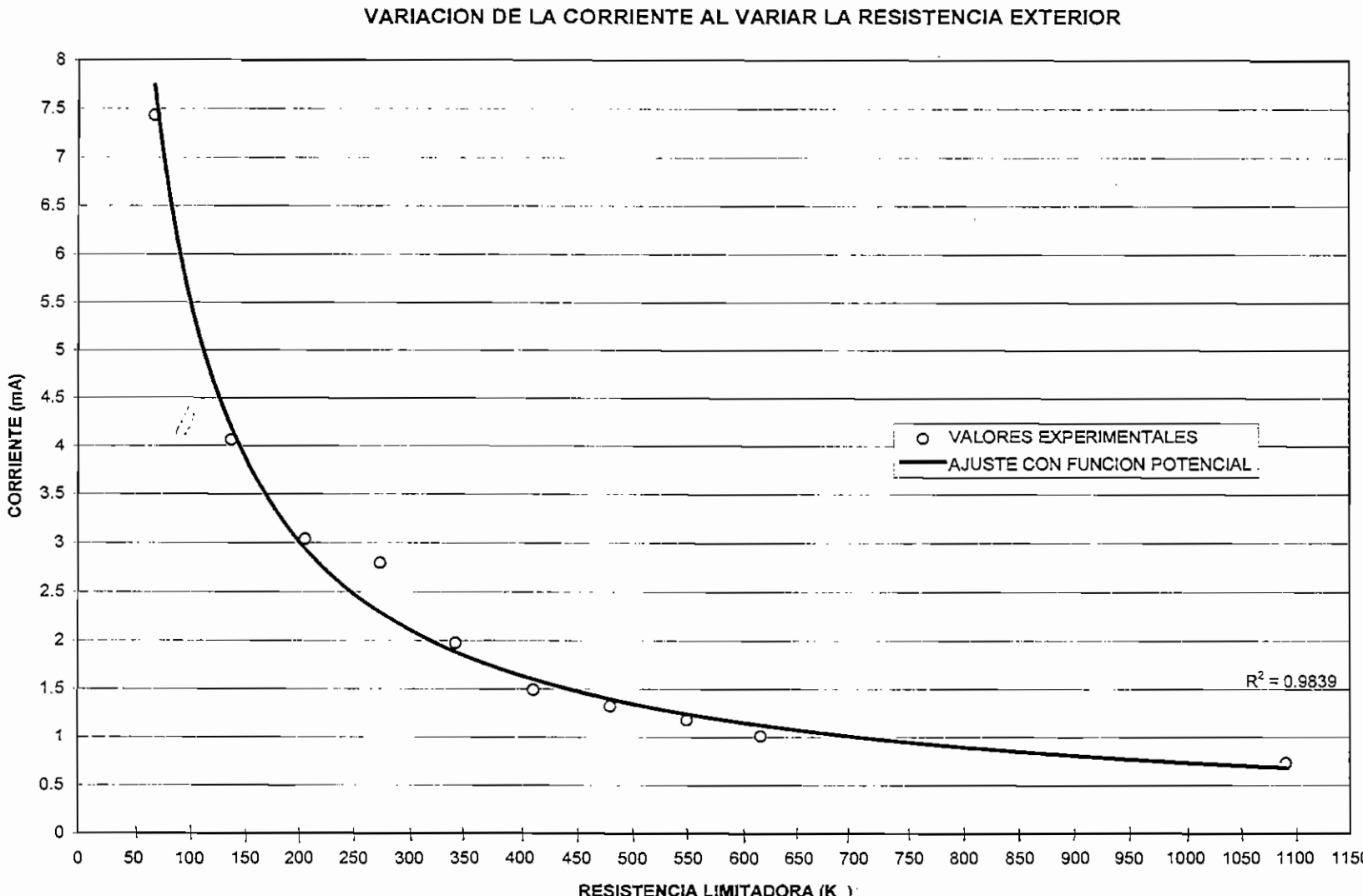



**Figura 3-5.** Corriente al cual se inicia la descarga luminiscente

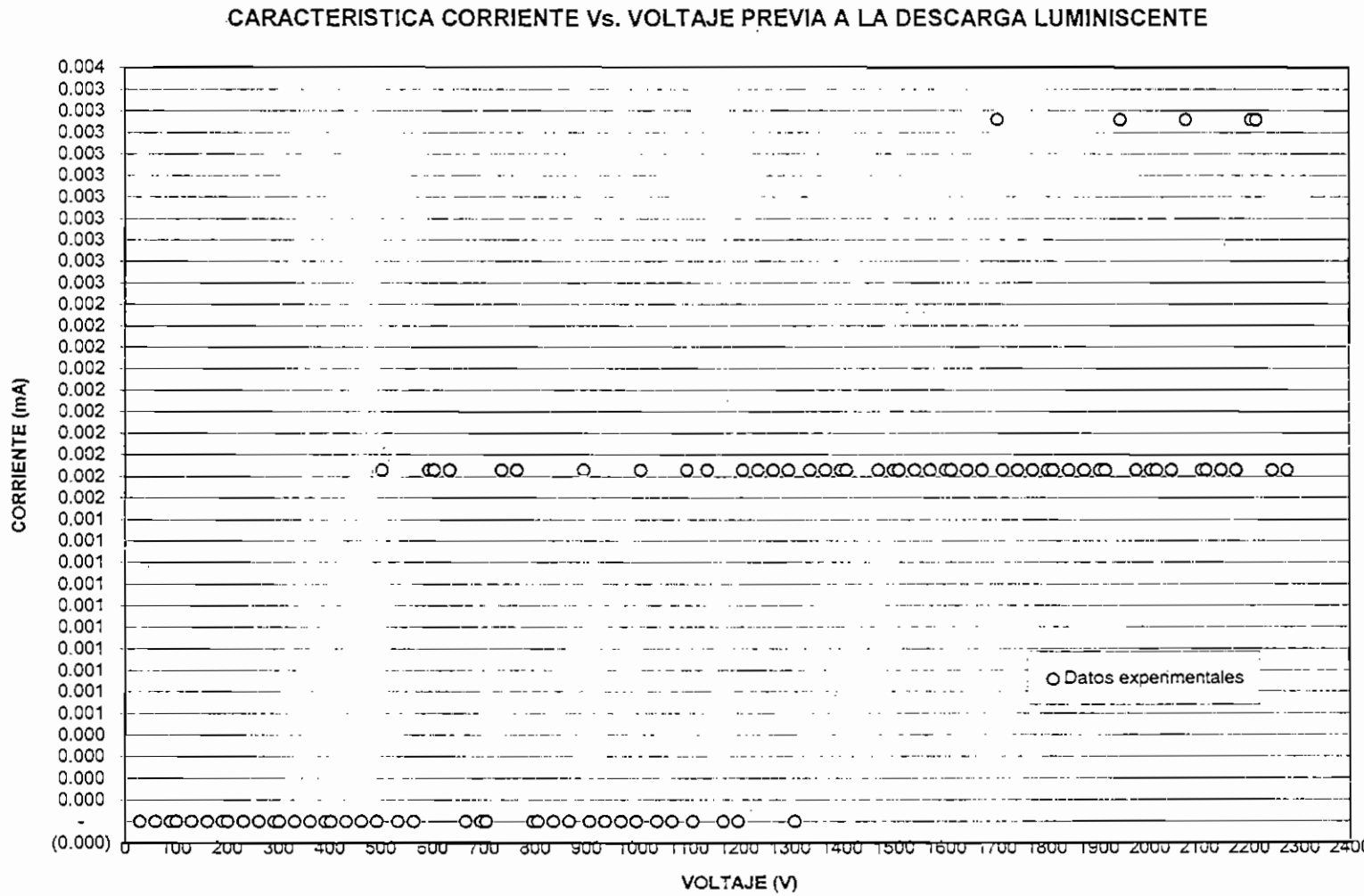



**Figura 3-6.** Caracteristica Voltaje-corriente de la descarga luminiscente

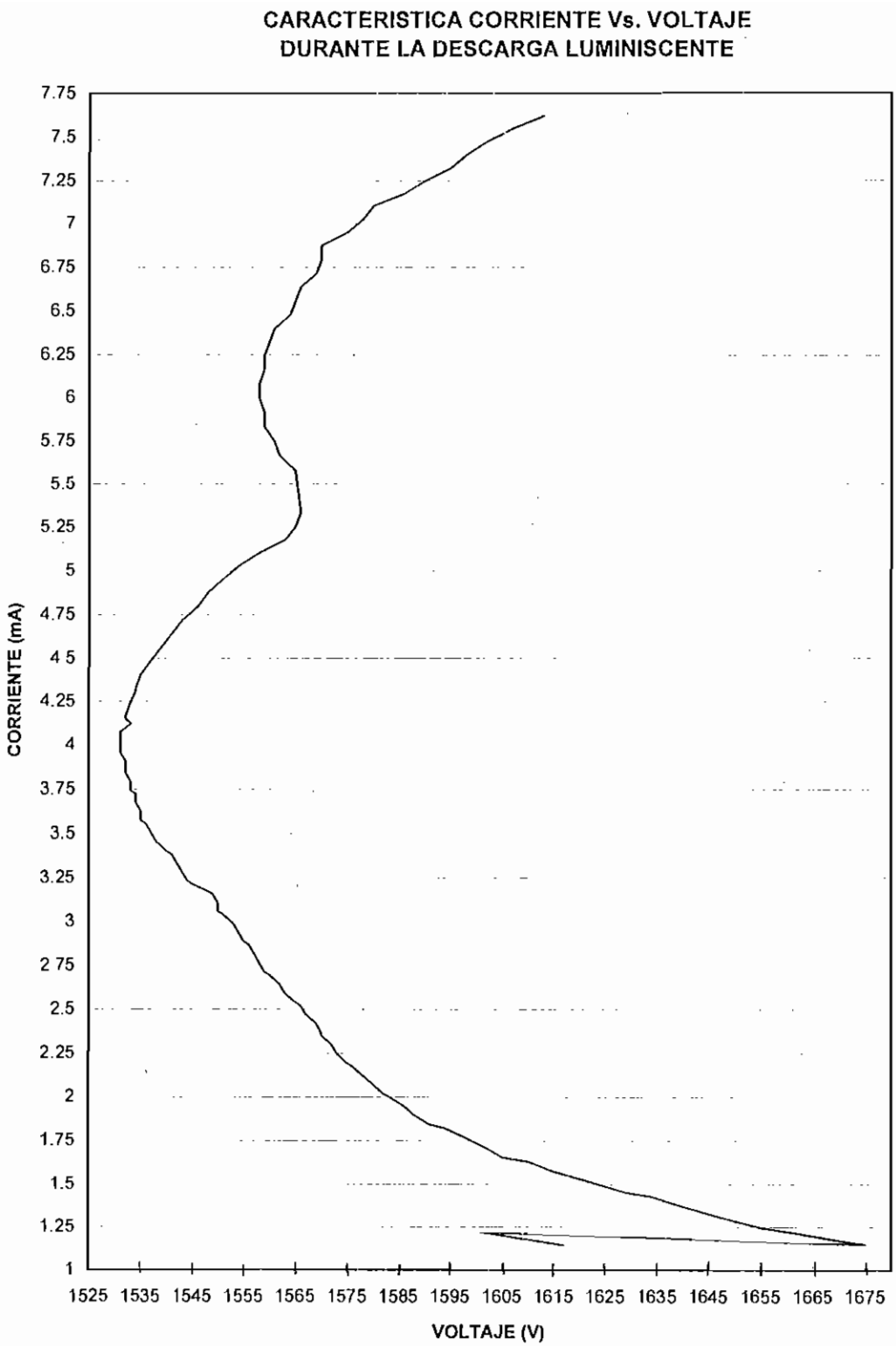



**Figura 3-7**. Caracteristica Voltaje-corriente durante la descarga luminiscente.

terminado su construcción, con el fin de determinar las condiciones de operación con las cuales se trabajaría al tratar las probetas.

El equipo de descargas # 3 se energizó con el equipo Fluke con lo cual la descarga luminiscente inició con 1300 voltios, a los terminales de la fuente, y 490 voltios entre ánodo y cátodo: se uso el electrodo cónico en el ánodo y la presión registró un valor de 2 mmHg.

La descarga entonces se inició con una corriente de (1300-490)V /614 kΩ = 1.319 mA. Se fue elevando el voltaje hasta que al llegar a un valor de 7200 voltios se desconectó el equipo debido a que actuó el relé de protección de 12 mA.

La descarga luminiscente se produjo en una pequeña región de la superficie del cátodo, además no se mantuvo en un solo lugar desplazándose continuamente. Para solucionar esto se usó un cilindro de vidrio de 8 cm. de longitud y 3 centímetros de diámetro interior, con ello se concentró la descarga dentro del tubo de vidrio.

Con el fin de poder cubrir toda el área de la probeta se recurrió al equipo de alto voltaje, que se utiliza para realizar pruebas en equipos ya que con el mismo se pueden obtener hasta 50 mA (el transformador es de 5 kVA, 100 KV ) con altos voltajes continuos rectificados con el uso de los diodos y capacitores.

El circuito que se usó para rectificar la señal se presenta en el siguiente esquema.

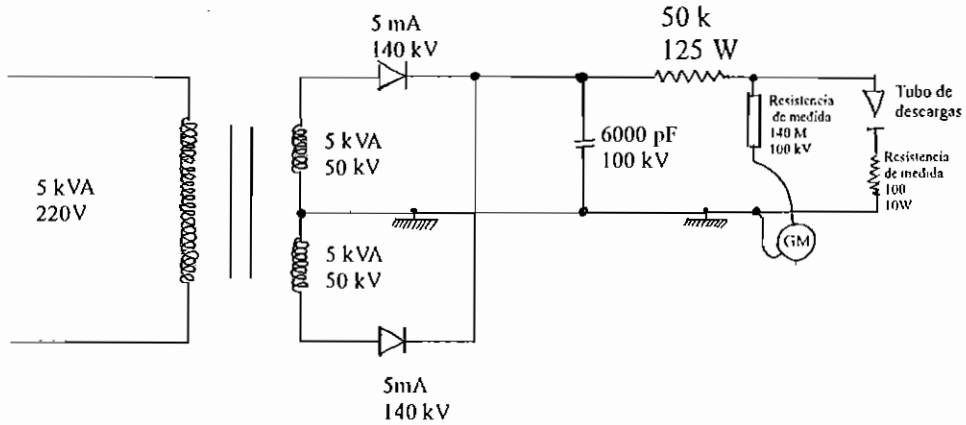



**Figura 3-8** Circuito rectificador para la obtención de altos voltajes continuos con el uso del transformador de pruebas del laboratorio de alto voltaje.

En estas condiciones la luminiscencia se produjo sobre toda la superficie con voltajes relativamente bajos .

Se determinaron los voltajes con los cuales se producía la descarga luminiscente al variar el tipo de electrodo, con el fin de establecer la configuración de placas más adecuada para realizar el tratamiento. Los resultados que se obtuvieron se detallan en la tabla 3-1.

Se comenzó a usar el electrodo tipo aguja, ya que como se observa en la tabla 3-1 la descarga se produce al menor valor del voltaje con un valor alto de corriente comparado con los otros electrodos.

Debido a que la corriente que podían soportar los diodos rectificadores de potencia era de 5 mA esto causó que se limite la corriente que se demandaba del transformador ya

que el cálculo de la corriente que debía tener el transformador en el lado de baja debía ser: Ip= 5mA* 100kv/220v = 2.27 A y se estuvo trabajando con corrientes alrededor de 5 A.

| *Tipo de electrodo* | *Distancia interelectródica (cm)* | *Presión (mmHg)* | *Voltaje de inicio (V)* | *Voltaje sobre la resistencia de 100Ω* | *Corriente (mA)* |
|---|---|---|---|---|---|
| *Aguja*[4] | 6.3 | 1.5 | 421.67 | 0.5267 | 5.267 |
| *Circular plano (1.5 cm de diámetro)* | 6 | 1.5 | 440 | 0.405 | 4.05 |
| *Redondeado y en punta* | 6.1 | 1.5 | 513.3 | 0.443 | 4.43 |
| *Cónico* | 6.1 | 1.5 | 496 | 0.4826 | 4.826 |
| *Circular plano (2.5 cm de diámetro)* | 6 | 1.5 | 484 | 0.411 | 4.11 |
| *Semiesferico* | 6 | 1.5 | 439.3 | 0.4243 | 4.243 |
| *Cañón*[5] | 6 | 1.5 | 440.67 | 0.574 | 5.74 |

**Tabla 3-1** Características de voltaje y corriente obtenidas para cada electrodo. Se tomaron tres medidas de los voltajes y se las promedió.

Se colocó una resistencia de 100 Ω 10 W en serie con la cámara de descargas para observar la forma de onda con el uso de un osciloscopio. La señal presentaba picos que la distorsionaban, además de presentar componentes en alterna.

Por ello se recurrió inicialmente al uso de diodos de señal con un voltaje pico inverso de 1000 V y 3A , este fue el voltaje más alto para diodos comunes que se halló en el mercado. Se pensó en la implementación en una red de atenuación con el fin de eliminar las discontinuidades que se producían en la onda.

[4] Este electrodo se lo tenía disponible en el laboratorio de alto voltaje.
[5] Este electrodo tiene una forma similar a los electrodos que se usan para los tubos de neón; su diseño especial permite dirigir de mejor forma la descarga luminiscente hacia el otro electrodo.

Para ello se recurrió a una red Snubber por lo que se colocaron dos capacitores de 22 uF 500V en serie con una resistencia de 240 Ω 10W y estos a su vez en paralelo con los diodos de señal. Al probar esta disposición se comprobó que el arreglo no efectuaba ninguna rectificación esto se debió a que la corriente no circulaba por los diodos sino únicamente por la red paralela resistencia-capacitor.

A partir de entonces se eliminó la red snubber y solamente se colocaron los diodos. Los resultados fueron buenos ya que la señal rectificada no presentaba picos ni discontinuidades que alteren la onda.

Superado este inconveniente de los diodos entonces se presentó otro. El transformador de pruebas tiene una potencia de 5 kVA y 100 kV de voltaje en alta, con lo cual se podía disponer a la salida de 50 mA lo cual limitaba la realización de las pruebas y ponía en riesgo la integridad del transformador.

La alternativa que se eligió para salvar este inconveniente fue usar dos transformadores de distribución de distintas potencias pero con los adecuados valores de voltajes y corrientes en alta para continuar con los experimentos.

Los transformadores se los consiguió en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y sus características eléctricas son:

*Transformador 1* : 10 kVA, 4160 / 2400 V , 220 / 210 V

*Transformador 2* : 5 kVA, 13200 / 7160 V , 220 / 110 V.

Para filtrar la señal luego de efectuar la rectificación de la misma se usaron los capacitores de 22 uF 500 V los que no se sirvieron para confoumar la red de atenuación de picos. Se colocaron en serie 10 capacitores (2.2 uF) con lo cual el voltaje a los terminales podía llegar a 5000 V.

Debido a que cada transformador debió usar un variador de voltaje ya que el voltaje en alta de cada uno y su relación de transformación eran diferentes, se emplearon dos variadores de voltaje que independientemente alimentaron a cada transformador.

El circuito que se implementó para obtener alto voltaje continuo fue el siguiente:

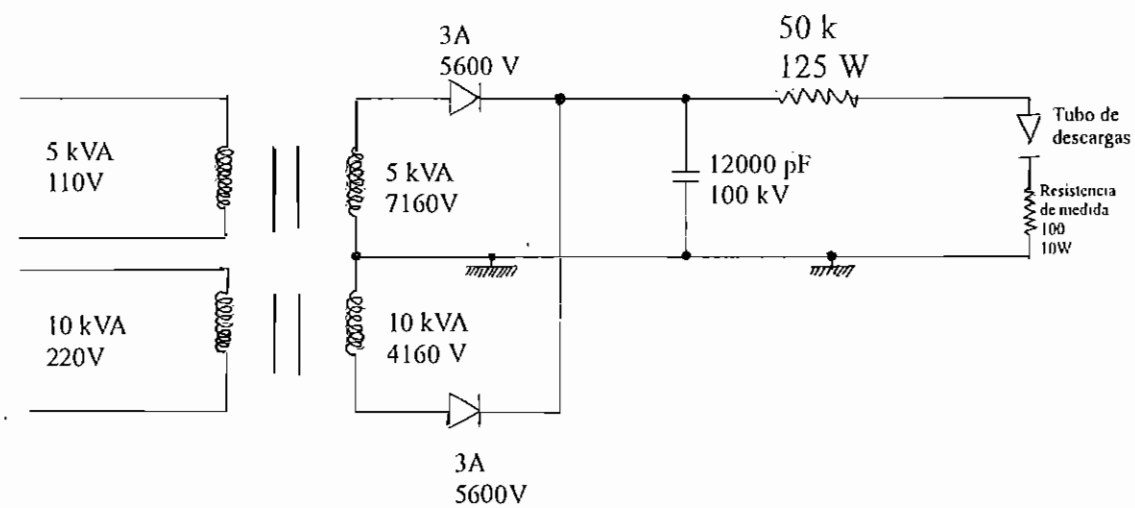



**Figura 3-9** Circuito rectificado para la obtención de altos voltajes continuos con el uso de dos transformadores de distribución.

Se fue elevando el nivel del voltaje de cada uno considerando que uno de ellos entregaba un voltaje en alta 2.4 veces mas que el otro. Cada arreglo de diodos para entonces estaba conformado por 5 diodos, con lo cual el voltaje máximo con el cual se

podía trabajar estaba determinado por el voltaje pico inverso, el cual asumiendo una eficiencia del 80% nos daba 4000 V.

Se colocó como carga del circuito una resistencia de 20 kΩ 10 W en serie con una de 100Ω 10W ( para tomar una señal con el osciloscopio ). Cuando sobre la resistencia de 100Ω se tuvo un voltaje D.C. de 800mV el rizado no llegaba a ser de 1mV, es decir que sobre la carga se tenía un voltaje D.C. de 160 V con un rizado pico-pico de 20 V.

Al desconectar uno de los transformadores y observar la señal en el osciloscopio se observó que ésta se mantenía como en el caso anterior aún siendo rectificación de media onda. Es decir que los capacitores realizaron un buen trabajo de filtrado.

Antes de energizar el tubo de descargas se desconectó la resistencia de carga, se ingresó nitrógeno en la cámara de descargas y se lo vacio con la bomba, inmediatamente se comenzó a elevar el voltaje.

Los electrodos se hallaban en la máxima separación que el equipo lo permite y con el electrodo tipo C en el ánodo con el fin de producir la descarga luminiscente en la cual se puedan distinguir las distintas regiones de la misma. Se fue aumentando el voltaje en los dos transformadores pero al llegar a un valor cercano a 4000 voltios uno de los capacitores se cortocircuito provocando una reacción en cadena en los demás, la corriente en uno de los ramales se elevo dañando a los diodos.

Por ello se decidió usar dos capacitores de potencia en paralelo, de 6000 pF 100 kV del equipo de pruebas de alto voltaje; además se reemplazaron los diodos quemados para

trabajar en rectificación de onda completa y en cada ramal se usaron 7 diodos en serie (5600 V de voltaje reverso ).

En la cámara se acortó la distancia interelectródica hasta dejarla en 15 cm. y se cambió el ánodo por el electrodo con la aguja de coser.

Con esta nueva disposición se fue elevando el voltaje en los dos transformadores hasta que con un valor de 1900 voltios (medidos a los terminales de uno de los transformadores) se produjo la descarga luminiscente.

En el osciloscopio no se registró la presencia de ninguna señal mientras se fue subiendo el voltaje, ya que no había circulación de corriente, pero inmediatamente producida la luminiscencia se observó que la señal estaba rectificada y sin discontinuidades ni transitorios, pero cada semiciclo alcanzaba picos de diferentes valores. Esto se corrigió manipulando los variadores de voltaje independientemente.

Inmediatamente se iniciaron las pruebas con las probetas # 11 y # 12 con el fin de determinar si el circuito trabajaba correctamente. En ambos casos se dio un tratamiento a cada probeta de 4:30 horas con lo que se comprobó que el equipo respondió perfectamente.

Finalmente se dio el tratamiento a la probeta # 13, en este caso no se usó el portaprobetas para determinar la variación del fenómeno en todo el volumen de la pieza.

### 3.2.3 VISUALIZACION DE LA DESCARGA LUMINISCENTE

La razón principal para la elaboración del tubo de descargas # 2 fue la de determinar las distintas regiones que se presentan en la descarga luminiscente y con ello escoger las condiciones mas adecuadas para realizar la nitruración iónica.

En el primer capítulo se estableció que la descarga luminiscente se compone de varias regiones de claridad y oscuridad.

Para el desarrollo de la nitruración iónica la región que más importancia tiene es aquella que más cerca del cátodo se encuentra, es una región de poco espesor, comparada con el resto de las regiones que forman la descarga. Se la conoce como *espacio oscuro catódico* ó también *espacio oscuro de Aston.*

Es una región en la cual los electrones que se proyectan desde el cátodo, debido a la presencia del campo eléctrico se desplazan hacia el ánodo, pero no han adquirido suficiente energía del campo para incrementar su velocidad y chocar con los iones positivos que se acercan al cátodo.

Como los electrones en esta región tienen baja energía no pueden por una parte provocar ionización de los iones positivos y tampoco recombinarse con ellos. Una recombinación con los iones positivos del gas haría que los electrones cedan su energía y resultado de ello se produzcan fotones.

Es decir que esta región esta formada principalmente por iones positivos del gas, los cuales adquiren una aceleración final antes de impactar el cátodo y mientras mayor espesor tenga esta región, mayor energía adquieren para afectar la superficie del electrodo y penetar en su reticulado metálico. Por ello esta parte de la descarga luminiscente es importante ya que su presencia es muy importante a efectos de conseguir el fenómeno de nitruración iónica.

En los experimentos con el tubo de descargas #2 se obtuvieron las siguientes fotos en las cuales se pueden observar las regiones de la descarga luminiscente.

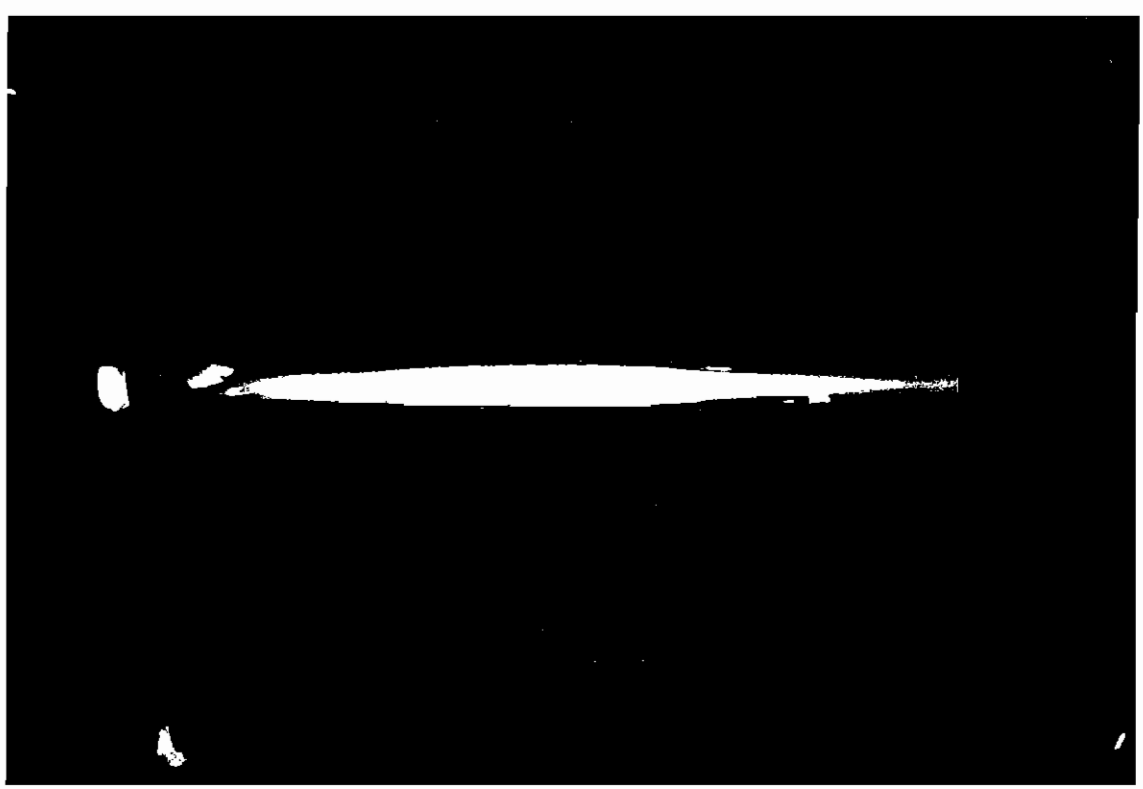


**Foto 3-6** Descarga luminiscente para el tubo de descargas # 2. La descarga se produjo con 7590V y 4 mmHg ; p*d = 208.8 cm*mmHg.

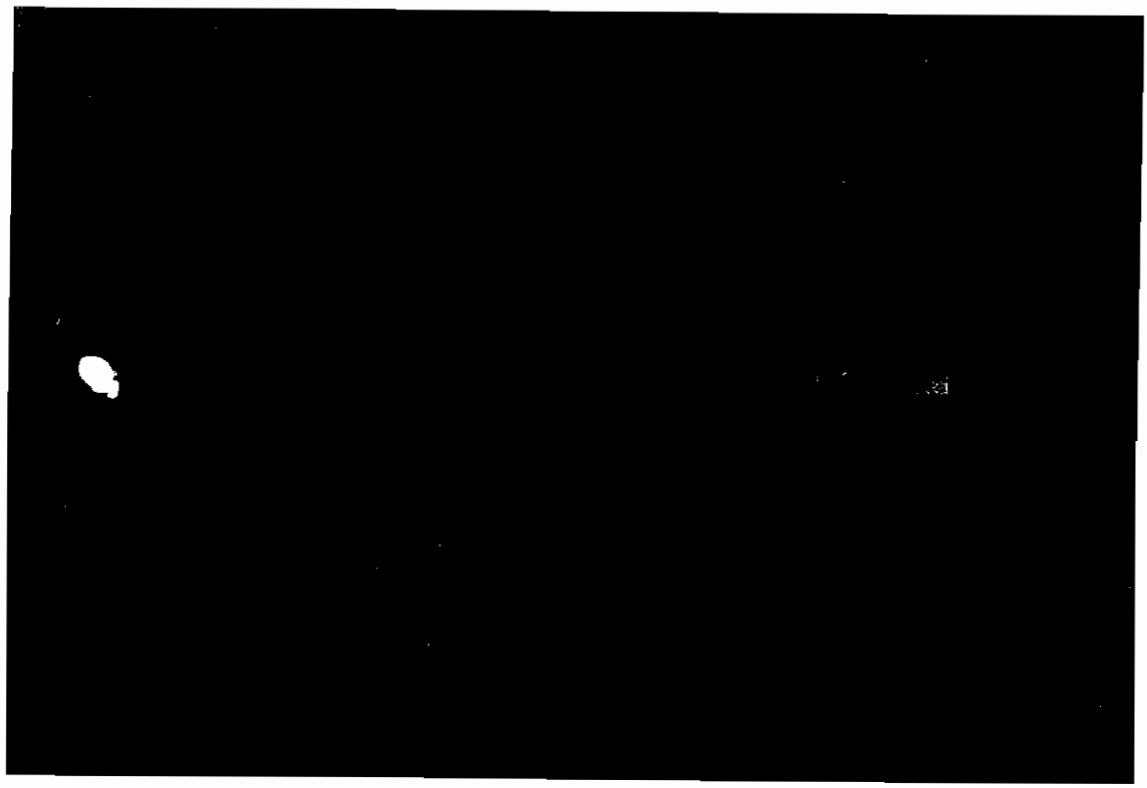


**Foto 3-7** Descarga luminiscente producida con 4400 V y 3.5 mmHg; p*d = 182.7 cm*mmHg.

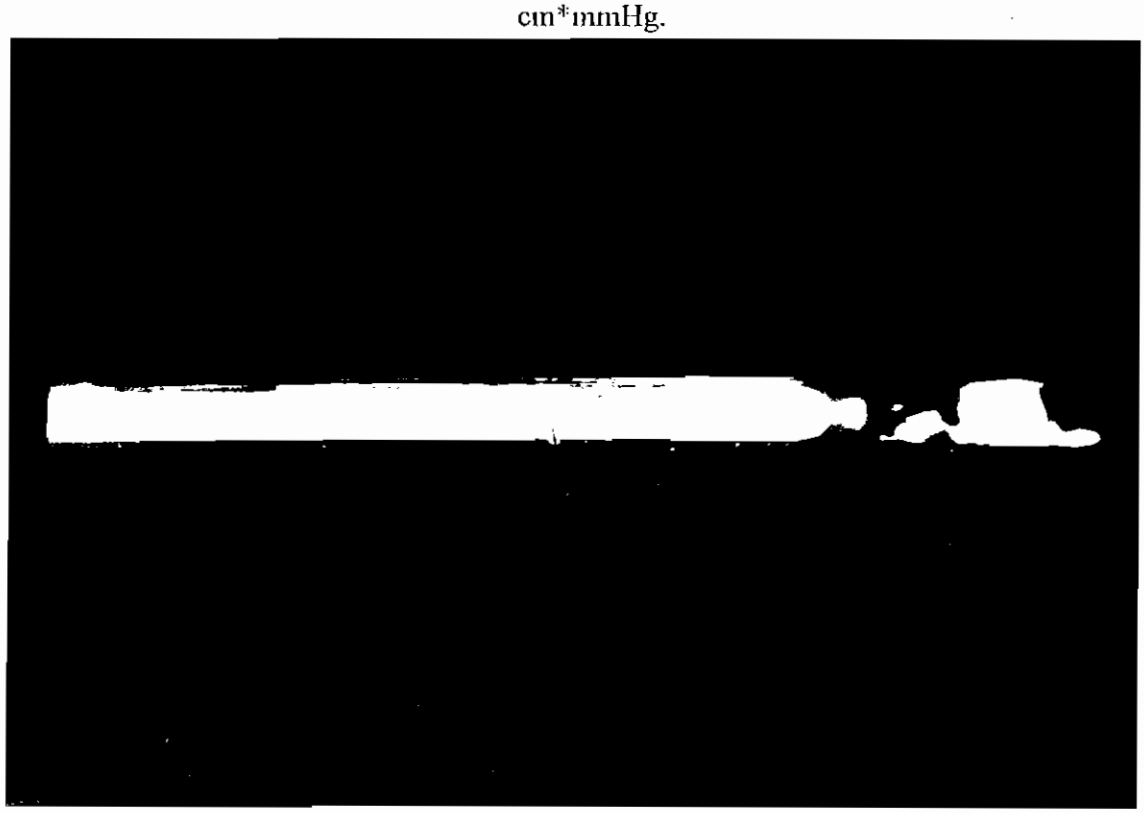


**Foto 3-8** Descarga luminiscente producida con 6500 V y 1.5 mmHg; p*d = 78.3 cm*mmHg.

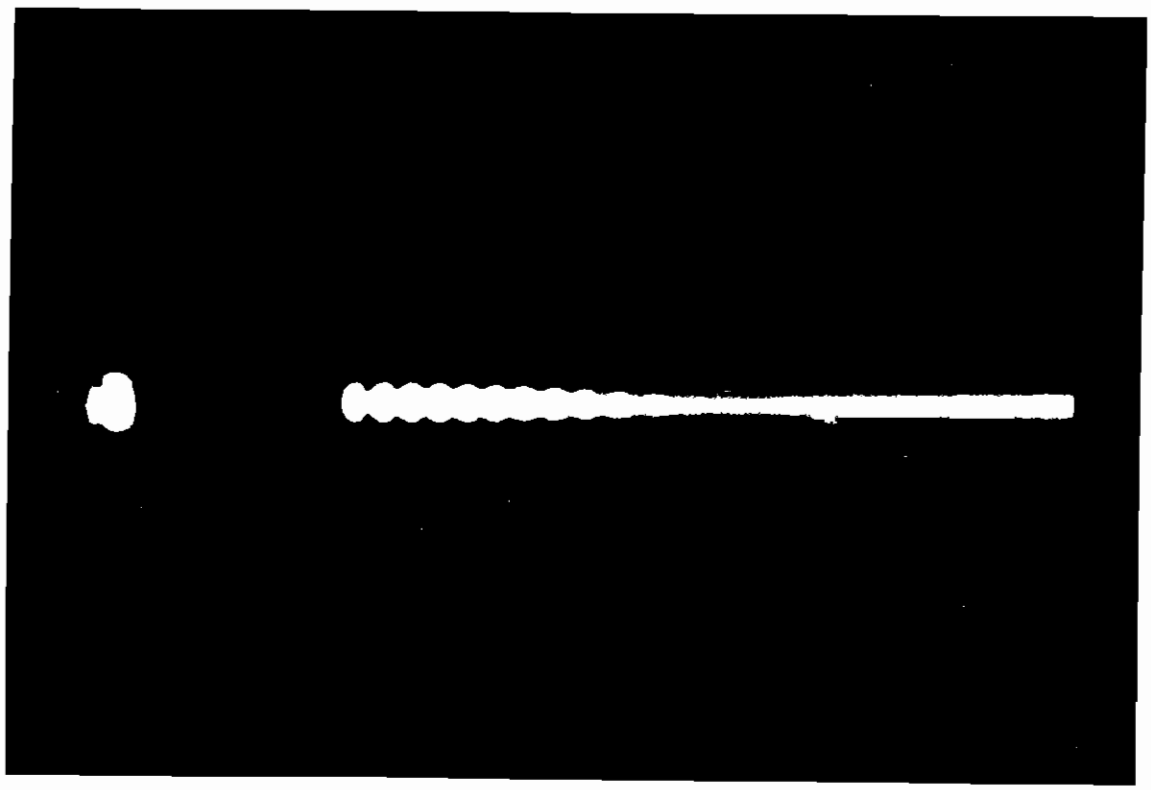


**Foto 3-9** Descarga luminiscente producida con 1700 V y 1 mmHg.

En la foto 3-6 se observa que la columna positiva o plasma cubre casi toda la longitud del tubo de descargas # 2, además se observa que la cara del cátodo permanece cubierto por la luminiscencia y no se pueden distinguir las regiones de claridad y oscuridad debido a la uniformidad de la descarga.

Las manchas blancas que se observan en el tubo son producidas por el reflejo de la luz sobre la resina blanca que se utilizó para cubrir las uniones de vidrio.

En la foto 3-7 se aprecia que la intensidad de la descarga ha disminuido en comparación con la foto anterior pero tampoco se pueden distinguir las regiones de

claridad y oscuridad. Ello se debe a que en este caso el voltaje que se utilizó es de menor magnitud que en la foto anterior y la corriente y por ende la densidad de corriente disminuyen.

En ambos casos la presión es semejante. Por lo tanto la disminución del voltaje acarrea una disminución de la intensidad luminosa a lo largo del tubo pero con ello no se hace evidente la región de oscuridad catódica.

La foto 3-8 presenta una intensidad luminosa mayor que la que produce en la foto 3-6; en el segundo caso el voltaje ha disminuido un 16% pero la presión ha disminuido casi a la tercera parte con lo cual hay menos partículas del gas pero sus energías llegan a ser mayores.

Los experimentos determinaron que a medida que la presión fue descendiendo, la intensidad luminosa fue aumentando, cubriendo cada vez mas el cátodo, y se debió bajar el voltaje porque sino la corriente aumentaban a tal grado que el equipo se desconectaba.

El contraste que se presenta entre la foto 3-8 y la 3-9 es muy claro. Se aprecia que en esta última foto se han formado regiones de claridad y oscuridad a lo largo del tubo y sobretodo en el cátodo se observa una región oscura adosada a él que en las fotos anteriores no se pudo observar. Recuérdese que este espacio oscuro es de gran importancia en el proceso de nitruración iónica.

A medida que la presión disminuye se observa que la región oscura catódica aumenta en tamaño y que las otras regiones de la descarga luminiscente se van desplazando

en dirección al ánodo.

Con la presión disminuida un descenso en el voltaje hace que las regiones de claridad y oscuridad se tracen de forma mas evidente.

## 3.3 PROCESO EXPERIMENTAL

En todas las pruebas que se realizaron antes de proceder a la descarga se limpiaron las probetas con un pulido fino con lija de acero #600 hasta eliminar imperfecciones o rastros de óxido en la superficie a nitrurar e inmediatamente se las limpió con alcohol metílico.

Se encendió la bomba de vacío y durante las pruebas se utilizo la presión más baja que fue posible obtener con el fin de conseguir que el espesor del espacio oscuro de Aston (espacio oscuro catódico) fuera el más grande posible.

Se escogió el electrodo (ánodo) mas adecuado para cada prueba y se fijó la distancia entre la pieza a tratar y el ánodo.

Las partes del portaprobetas inicialmente quedaron al descubierto, pero se observó que también intervenían en la descarga con lo cual la descarga no se concentraba sobre la probeta sino que se desplazaba en diferentes puntos en la cara del portaprobetas, por ello se recubrió la superficie del portaprobetas con cinta adhesiva aislante (nitto tape) con lo cual se consiguió que la descarga cubra únicamente la cara de la probeta que nos interesa.

También se colocó cinta adhesiva en parte de la barra que contiene al electrodo que actúa como ánodo para evitar que intervenga en la descarga.

Los voltímetros que se colocaron en el equipo permiten determinar la magnitud del voltaje que se está aplicando a los terminales del tubo de descargas, así como la corriente que circula por el mismo.

Este último dato es importante, ya que con ello podemos determinar la densidad de corriente que se registra en la probeta. El área de la misma es de (7.5 x 2.5) $cm^2$ = 18.75 $cm^2$ y si están circulando unos 10 mA por el tubo de descargas durante la luminiscencia entonces tendremos 0.533 mA/ $cm^2$.

En el cuarto volumen de la Enciclopedia Metals Handbook[6] se manifiesta que para la nitruración gaseosa se trabaja con valores de densidad de corriente de alrededor de 1mA / $cm^2$ , es decir que para las probetas que se utilizaron en este tratamiento, corrientes de alrededor de 18 mA son deseables para los fines que se desean lograr.

Los pasos que se siguieron para el tratamiento de cada una de las probetas fue el siguiente:

1. Limpieza de las probetas, especialmente la cara que se iba a exponer al tratamiento, mediante el uso de una lija de acero para agua granulación 600, con el fin de eliminar rayaduras, imperfecciones o rastros de óxido; inmediatamente se les dio un lavado

[6] AMERICAN SOCIETY FOR METALS; Metals Handbook; Volumen 4: Heat treating; p **214**.

con algodón empapado con alcohol etílico para eliminar rastros de oxido o metal dejados por el pulido.

**2.** Colocación de las piezas en el portaprobetas cuidando que al ajustar los tornillos de las piezas que sujetan la probeta, ésta mantenga un buen contacto con el resto de piezas del equipo.

**3.** Montaje del equipo; ajuste del tubo de resina a la tapas inferior y superior de aluminio.

**4.** Selección y colocación del electrodo que hace las veces de ánodo durante la descarga luminiscente. Sellado del tubo al atornillar en la tapa superior el dispositivo que sujeta al ánodo.

**5.** Conexión de la tapa superior a la señal rectificada que se obtiene del equipo de alto voltaje (de los tres que consecutivamente se utilizaron) y de la cara inferior a la resistencia de medición de 100 Ω y esta a su vez a la referencia para cerrar el circuito.

**6.** Encendido de la bomba de vacío y apertura de las llaves de la cámara de pre-vacío con el fin de extraer el aire del interior de la cámara de descargas. Inmediatamente se cierra la llave del tubo de descargas que lo conecta con la cámara de pre-vacío y se ingresa nitrógeno a la cámara.

Para tener mayor seguridad en el contenido del gas en el interior se extrae el nitrógeno con la bomba de vacío y se lo vuelve a ingresar a la cámara y a extraerlo

nuevamente; se abre la válvula que permite la extracción del gas y se la mantiene así durante el desarrollo del experimento.

7.. Se enciende el equipo de alto voltaje y se va aumentando la magnitud del voltaje hasta conseguir la luminiscencia que cubra toda el área de la probeta, se toma este valor. Un incremento en el voltaje produce un respectivo aumento en la lumniscencia y en la corriente a través de la cámara de descargas.

Se aumenta el voltaje y se lo mantiene durante unos 10 minutos con el fin de producir una limpieza catódica del material; al cabo de este tiempo se regresa al voltaje que se tomó y con ese valor se mantiene el tratamiento durante el tiempo y con la presión que previamente se hayan escogido.

8. Cumplido el tiempo del tratamiento, se reduce el voltaje hasta cero. Es preferible dejar enfriar la probeta por al menos 20 minutos dentro de la cámara de descargas luminiscentes con el fin de evitar el contacto con el aire para prevenir la oxidación de las probetas.

9. Se desconecta la bomba de vacío y se saca la probeta de la cámara de descargas. Inmediatamente se la reviste de aceite para evitar su oxidación.

10. Se llevan a cabo las pruebas necesarias para determinar si el tratamiento ha producido el endurecimiento de la probetas.

En el Anexo 3 se puede consultar el proceso que se llevo adelante con cada una de las probetas tratadas con la descarga luminiscente.

A continuación se detallan las condiciones en las cuales se trataron las probetas y las observaciones respectivas durante el proceso experimental.

### 3.3.1 GEOMETRIA DE LAS PIEZAS TRATADAS

Las piezas tratadas tienen una geometría definida ya que sus dimensiones corresponden a probetas normalizadas que se usan en el laboratorio de metalografía de la Facultad de Ingeniería Mecánica para comprobar la validez de tratamientos efectuados sobre metales.

Para adaptarse a los requisitos de las pruebas mecánicas, las dimensiones de las probetas debían ser de: 75 mm x 25 mm x 5 mm.[7]

Las probetas fueron confeccionadas a partir de pletinas de acero común A-36 de bajo contenido en carbono a las cuales se las cortó a las dimensiones mas cercanas a las finales y con ayuda de una fresadora se consiguió que sus caras queden planas y perpendiculares entre sí.

[7] Estos datos fueron proporcionados por el Ingeniero Patricio Estupiñan profesor de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

### 3.3.2 TIEMPO DE EXPOSICION

Las probetas se sometieron a diferentes tiempos de exposición comenzando por 3, 3.3, 4.5,6, 8, 10 y 14 horas.

En la tabla 3-2 se detallan las condiciones en las que se realizó el tratamiento a las probetas:

| *Probeta* | *Tiempo de exposición (horas)* | *Distancia interelectródica (cm)* | *Presión (mmHg)* | *Electrodo tipo* | *Densidad de Corriente*[8] *($mA/cm^2$)* | *Observaciones* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 1+2= 3 | 7.5 | 2 | Cono | 0.645 | El proceso se realizó en dos etapas por cambio de equipo |
| 3 | 4.5 | 7.5 | 1.5 | Cono | 0.598 | |
| 4 | 6 | 7.5 | 1.5 | Cono | 0.692 | |
| 5 | 4.5 | 7.5 | 1.5 | Cono | 0.598 | Se realizó el tratamiento con aire |
| 6 | 3.3 | 1.3 | 1.5 | Aguja | 0.117 | |
| 7 | 10 | 0.5 | 1 | Aguja | 0.035 | Se alimentó nitrógeno cada 2 horas |
| 8 | 4+4=8 | 0.5 | 1.3 | Aguja | 0.035 | Tratamiento en dos etapas debido a corte de energía |
| 9 | 14 | 0.5 | 1.3 | Aguja | 0.035 | |
| 10 | 6 | 0.5 | 1.3 | Aguja | 0.0821 | Se redujo el área a casi la mitad |
| 11 | 6 | 15 | 1 | Aguja | 1.48 | Se inyectó nitrógeno cada 5 minutos |
| 12 | 6 | 15 | 0.5 | Aguja | 1.48 | |
| 13 | 4.5 | 16.1 | 0.5 | Aguja | 1.528 | No se usó el portaprobetas |

**Tabla 3-2** Condiciones del tratamiento a las probetas.

[8] Para calcular la densidad de corriente, el área de la probeta es de 7.5cmx2.5cm = 18.75 $cm^2$

## 3.4 PRUEBAS EN PIEZAS ESTUDIADAS

### 3.4.1 ENSAYO METALOGRAFICO

El ensayo metalográfico consistió en la observación de las piezas tratadas con la descarga luminiscente, en un medio con nitrógeno al vacío, mediante el uso de un microscopio metalográfico.

Para ello se cortó, perpendicularmente a la cara tratada, un pedazo de cada probeta y se la colocó junto con dos pedazos de pletina para darle estabilidad al pedazo de la probeta en el momento del pulido.

Las muestras se prepararon a partir de la probeta # 2 ya que la # 1 recibió el tratamiento en una pequeña área, debido a que el equipo Fluke de alto voltaje no entregó la suficiente cantidad de corriente que permita a la descarga luminiscente cubrir totalmente a la probeta.

Estas tres piezas de metal se las puso en un pedazo de tubo de PVC de 2 pulgadas de espesor de 8 centímetros de longitud, al cual se sella una de las caras circulares. Una vez colocadas las piezas dentro de este envase, con la cara tratada de la probeta perpendicular a su base sellada, se procede a preparar unos 50 $cm^3$ de resina de poliester y verterla sobre este molde.

Después que ha secado la resina se la desmolda y se pule la cara inferior con lijas (de acero para agua) de varias granulaciones hasta llegar a la # 600; después se emplean

dos máquinas que disponen de discos circulares sobre los cuales giran sendos paños a los que se les agrega alúmina en disolución (abrasivo), al primero se le coloca alúmina 1u y al otro 0.3u (granulación de este material) y se hacen girar los discos.

La cara circular de la resina con la probeta en su interior se la va puliendo hasta que no existan rayas en su superficie y refleje como un espejo.

Una vez hecho esto se procede a atacar la cara de la probeta con nital ( 98% ácido nítrico, 2% alcohol etílico) empapado en un algodón por espacio de unos 20 segundos, se lava la probeta con agua y se le echa etanol al 98%, luego se elimina todo vestigio de humedad con un secador manual de aire.

Con la probeta pulimentada y atacada químicamente es posible visualizar en el microscopio metalográfico las diferentes regiones que se forman en el metal.

Para observar las probetas se usa diferentes contrastes sobre las mismas con el fin de determinar si se han producido cambios estructurales en las probetas.

Con ayuda del microscopio se pudo ver de perfil la capa que había sido tratada. Una capa obscura cubre todas las probetas pero no se pudo determinar si esta era causada por difusión o por la adhesión a la superficie de algún compuesto.

En cada una de las probetas se determinó el espesor de la capa formada con ayuda de una escala en unidades de pulgadas que tiene el microscopio. Los valores y las observaciones en cada probeta son las siguientes:

| *PROBETA No.* | *ESPESOR DE LA CAPA OSCURA (mm)* | *OBSERVACIONES* |
|---|---|---|
| 2 | 0.0508 | No se puede distinguir cambios microestructurales; la superficie extremadamente lisa |
| 3 | 0.0254 | No se puede distinguir cambios microestructurales; la superficie extremadamente lisa |
| 4 | 0.0381 | Se notan ligeros cambios estructurales en el material. Superficie lisa |
| 5 | 0.0508 - 0.0635 | Superficie muy lisa |
| 6 | 0.0635 - 0.0762 | Superficie muy lisa |
| 7 | 0.0254 | Superficie muy lisa |
| 8 | 0.0254 - 0.0381 | Superficie muy lisa |
| 9 | 0.0254 | Superficie muy lisa |
| 10 | 0.0381 | Superficie muy lisa |
| 11 | 0.0381 - 0.0508 | Superficie irregular aparentando corrosión. |
| 12 | 0.0381 - 0.0508 | No se puede distinguir cambios microestructurales; la superficie extremadamente lisa |
| 13 | 0.0381 | Superficie muy lisa |

**Tabla 3-3** Resultados de las observaciones en las probetas tratadas. Los espesores de la capa oscura en algunos casos son valores promediados.

En todas las probetas se observó una excesiva linealidad de las caras que fueron tratadas con la descarga en contraste con las caras que fueron cubiertas para que no recibieran el tratamiento, excepto en el caso de la probeta que fue tratada con nitrógeno alimentado cada 5 minutos y se vio que tenía una superficie irregular y había sufrido el deterioro de su estructura.

El equipo en el que se observó las probetas es un microscopio metalográfico Bausch & Lomb modelo Xenón 450 que permite aumentos de hasta 3000 aumentos y tiene 4 contrastes diferentes para analizar las probetas.

Para determinar las componentes de la capa oscura que se observó en las piezas tratadas se debía recurrir al uso de un microscopio electrónico que no se lo pudo hacer debido a que en la Politécnica Nacional no se contaba con tal ayuda.

Por ello se recurrió a la determinación de cambios en la estructura del material mediante el ataque químico y físico a las probetas. Esto se describe en el siguiente numeral.

### 3.4.2 ENSAYO DE IMPACTO Y DUREZA.

Como se mencionó en el numeral 2.5.3 del segundo capítulo, si las piezas nitruradas se las sumerge en una solución de sulfato de cobre éstas no deberían ser recubiertas por el cobre.

Para ello en el laboratorio de Analítica de la Facultad de Ingeniería Química se consiguió el sulfato de cobre, que tiene forma cristalina y de color azulado; se colocaron 2 gr. en 200 $cm^3$ de agua.

En un envase plástico se colocó una pequeña cantidad de esta solución, la suficiente para que cubra 1 centímetro de altura de las caras de las probetas que se depositaron en su interior.

Para realizar esta prueba se escogieron dos probetas representativas de las pruebas de nitruración iónica que se llevaron a cabo: la una (probeta # 9) fue tratada con una descarga luminiscente por espacio de 14 horas y la otra (probeta # 10) se la trató por un

tiempo de 6 horas disminuyendo el área de la probeta a la mitad, con lo cual aumentó la densidad de corriente al doble con respecto a la probeta #9.

Visualmente los resultados no son concluyentes ya que se observó las muestras, luego de dejarlas por un día en la solución de sulfato de cobre, que la solución había atacado todas las áreas de las probetas que tuvieron contacto con la misma.

El siguiente ensayo que se practicó fue el de determinar la dureza de las caras tratadas, para ello se recurrió a un durómetro portátil[9] con el cual se producieron varias penetraciones en el material con una punta de diamante y una carga de 60 Kg.

En la probeta #9 en la cara tratada se obtuvo una medición de 78 Rc y en cara no tratada 80 Rc; en la probeta #11 en ambas cara se registraron valores de 74 Rc.

Estas medidas no aportaron ninguna conclusión ya que la punta de diamante penetro la capa superficial oscura y pasó al metal base con lo que las medidas tomadas no eran representativas.

Por ello se requirió analizar las probetas con el uso de un equipo de microdureza. Se dispone de este equipo en la Facultad de Mecánica pero no se encuentra funcionando, por ello se analizaron las pruebas en el Laboratorio de Metalurgia de la ESPE, en el cual además de obtener los resultados de microdureza se tomaron fotos de las probetas en donde se puede apreciar las indentaciones sobre las mismas.

[9] Esta ayuda fue proporcionada por el Ingeniero Miguel Enazo profesor de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

El equipo de microdureza es un modelo Mo fabricado por Acco; en el manual del equipo se dan las instrucciones para su uso y la forma de determinar la dureza a partir de la medición de la diagonal mayor de la huella que el indentador con punta de diamante deja en el material que se analiza.

En el manual de este equipo se indica la fórmula y las correcciones que se deben hacer a las mediciones de la diagonal de las indentaciones, ésta es:

$$K.H.N. = \frac{L}{l^2\ C}$$

Donde:

**K.H.N.** = Dureza en grados Knoop

**L** = Carga del indentador en kg. En nuestro caso se usó una carga de 0.5 kg.

**l** = Longitud de la diagonal mayor (mm)

**C** = 0.07028 para indentadores perfectos con ángulos de 172° 30´00´´ y 130° 00´00´´

Luego de medir la longitud de la diagonal mayor en cada una de las indentaciones, se deben usar las siguientes escalas de corrección:

| *AUMENTO DE LA LENTE* | *CORRECCION PARA TENER UN RESULTADO EN MICRAS* |
|---|---|
| 40 X | La medición de la diagonal mayor multiplicarla por 0.2129 |
| 20X | La medición de la diagonal mayor multiplicarla por 0.4252 |
| 10X | La medición de la diagonal mayor multiplicarla por 0.8475 |

**Tabla 3-4** Correcciones que se deben realizar a las medidas del equipo de microdureza.

Luego de esto se procedió a la calibración del equipo, lo cual consistió en determinar la validez de las mediciones usando una medida patrón que da el equipo de microdureza; además en el manual del equipo se manifiesta que la precisión del equipo permite obtener valores con un margen de error de ± 10 % lo cual se debe tomar en cuenta el momento del análisis de los resultados.

Después de medir la longitud de la diagonal mayor se calcula la dureza Knoop y mediante una tabla de equivalencias[10] se establecen los valores de dureza en las escala Rockwell B o C. La escala Rockweel C (Rc) se usa para los materiales mas duros y para materiales blandos la escala Rockweel B (Rb).

Para ver las equivalencias entre las escales de dureza recurrir al Anexo **4**.

Con un ejemplo se detalla la forma en que se calculan los valores de dureza Knoop. La primera medida que se obtuvo para la probeta # 2 fue el valor de 210, este valor se multiplica por la constante de corrección, que para el aumento de 10 X es de 0.8475, para obtener una cantidad en micras, y con la formula se obtiene la dureza Knoop, así :

$$\textbf{K.H.N.} = \frac{0.5\ kg}{(210 \times 0.8475 \times 0.0001\ mm)^2 \times 0.07028} = 224.6$$

Esta cantidad se aproxima a su inmediato superior debido a que los valores de dureza se manejan cantidades enteras positivas; por ello se tendría un primer valor de dureza Knoop de 225.

[10] SERVICE DIAMOND TOOL COMPANY, Service diamond Hardness conversion chart, Michigan, USA.

En la foto 3-10 se observan las indentaciones o impresiones Knoop de dureza que se realizaron sobre cada una de las probetas. En este caso se trata de la probeta # 11 a la que se inyecto nitrógeno cada 5 minutos para su tratamiento.

A pesar que el enfoque no es bueno se aprecia que las marcas tienen un espaciamiento uniforme y la longitud de la diagonal aumenta a medida que nos adentramos en el metal lo cual quiere decir que la dureza del material va disminuyendo.

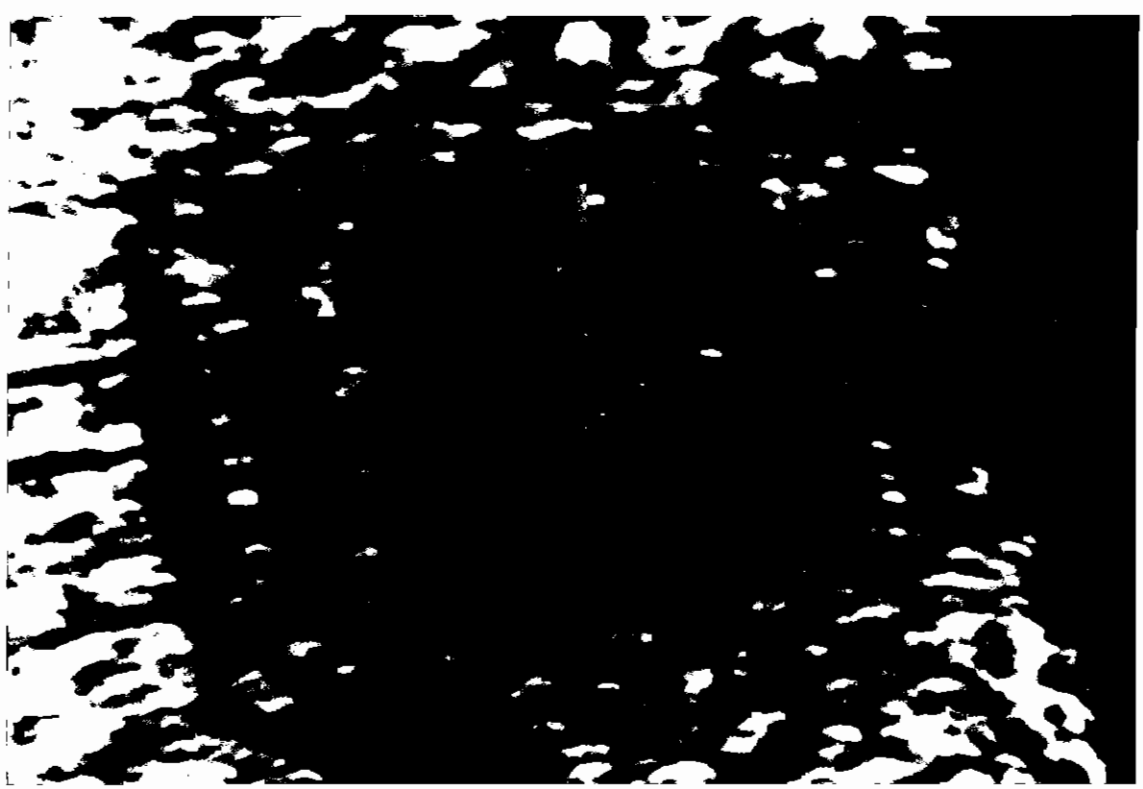


**Foto 3-10.** Indentaciones de dureza Knoop realizadas por una punta de diamante de forma piramidal sobre el perfil de la cara de la probeta tratada. (280X)

Se observa además la capa oscura que se ubica al filo de la cara de la probeta y una clara huella producida por la punta de diamante sobre la resina que contiene al pedazo de_

metal tratado que se esta analizando; la indentación sobre la resina evidentemente es más grande debido a la menor dureza de la misma.

A continuación se dan los valores de la diagonal (en unidades del microscopio, todos con 10X de aumento ), los espaciamientos de cada medida desde la superficie hacia el interior de cada probeta, los valores calculados en escala Knoop y su conversión en escala Vickers.

**Probeta # 2 :**

| *Distancia desde el borde(mm)* | *0* | *0.05* | *0.1* | *0.15* | *0.2* | *0.25* | *0.3* | *0.43* | *0.56* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Diagonal (u.m.)*[11] | 210 | 213 | 219 | 230 | 234 | 234 | 243 | 252 | 258 |
| *Dureza Knoop* | 225 | 218 | 207 | 187 | 181 | 181 | 168 | 156 | 149 |
| *Dureza Vickers* | 210 | 200 | 190 | 172 | 165 | 165 | 153 | 141 | 137 |

**Probeta # 3 :**

| *Distancia desde el borde(mm.)* | *0* | *0.05* | *0.1* | *0.15* | *0.2* | *0.25* | *0.3* | *0.43* | *0.68* | *0.94* | *1.194* | *1.45* | *1.7* | *1.96* | *2.21* | *2.31* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Diagonal (u.m.)* | 232 | 201 | 220 | 231 | 236 | 255 | 261 | 239 | 247 | 244 | 247 | 233 | 228 | 221 | 227 | 238 |
| *Dureza Knoop* | 184 | 245 | 205 | 186 | 178 | 152 | 145 | 173 | 162 | 166 | 162 | 182 | 191 | 203 | 192 | 174 |
| *Dureza Vickers* | 169 | 234 | 190 | 169 | 165 | 139 | 132 | 159 | 147 | 153 | 147 | 165 | 176 | 185 | 176 | 162 |

**Probeta # 4 :**

| *Distancia desde el borde(mm.)* | *0* | *0.05* | *0.1* | *0.15* | *0.2* | *0.25* | *0.3* | *0.43* | *0.68* | *0.94* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Diagonal (u.m.)* | 221 | 226 | 232 | 229 | 238 | 249 | 257 | 239 | 239 | 239 |
| *Dureza Knoop* | 203 | 194 | 184 | 189 | 175 | 160 | 150 | 173 | 173 | 173 |
| *Dureza Vickers* | 185 | 180 | 169 | 172 | 162 | 147 | 137 | 159 | 159 | 159 |

[11] u.m.= Son la unidades que arroja el microscopio y que deben ser corregidas multiplicandolas por su respectivo valor (dependiendo del tipo de objetivo) para obtener el valor en micras.

## Probeta # 5 :

| *Distancia desde el borde(mm.)* | *0* | *0.05* | *0.1* | *0.15* | *0.2* | *0.25* | *0.3* | *0.35* | *0.41* | *0.46* | *0.51* | *0.56* | *0.68* | *0.81* | *0.94* | *1.1* | *1.2* | *1.32* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Diagonal (u.m.)* | 196 | 197 | 205 | 207 | 217 | 218 | 227 | 231 | 230 | 249 | 253 | 245 | 249 | 246 | 242 | 247 | 247 | 248 |
| *Dureza Knoop* | 258 | 255 | 236 | 231 | 210 | 208 | 192 | 186 | 187 | 160 | 155 | 165 | 160 | 164 | 169 | 162 | 162 | 161 |
| *Dureza Vickers* | 260 | 254 | 222 | 216 | 195 | 190 | 176 | 169 | 172 | 147 | 141 | 150 | 147 | 150 | 156 | 147 | 147 | 147 |

## Probeta # 6 :

| *Distancia desde el borde(mm.)* | *0* | *0.05* | *0.1* | *0.15* | *0.2* | *0.25* | *0.3* | *0.35* | *0.61* | *0.86* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Diagonal (u.m.)* | 215 | 227 | 227 | 235 | 238 | 243 | 251 | 260 | 260 | 260 |
| *Dureza Knoop* | 214 | 192 | 192 | 179 | 175 | 168 | 157 | 147 | 147 | 147 |
| *Dureza Vickers* | 200 | 176 | 176 | 165 | 162 | 153 | 144 | 135 | 135 | 135 |

## Probeta # 7 :

| *Distancia desde el borde(mm.)* | *0* | *0.05* | *0.1* | *0.15* | *0.2* | *0.25* | *0.3* | *0.35* | *0.41* | *0.457* | *0.51* | *0.56* | *0.81* | *1.1* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Diagonal (u.m.)* | 209 | 209 | 212 | 217 | 215 | 215 | 222 | 225 | 225 | 230 | 240 | 240 | 250 | 250 |
| *Dureza Knoop* | 227 | 227 | 220 | 210 | 214 | 214 | 201 | 196 | 196 | 187 | 172 | 172 | 158 | 158 |
| *Dureza Vickers* | 210 | 210 | 205 | 195 | 200 | 200 | 185 | 180 | 180 | 172 | 159 | 159 | 144 | 144 |

## Probeta # 8 :

| *Distancia desde el borde(mm.)* | *0* | *0.05* | *0.1* | *0.15* | *0.2* | *0.25* | *0.3* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Diagonal (u.m.)* | 207 | 224 | 235 | 238 | 238 | 238 | 238 |
| *Dureza Knoop* | 231 | 197 | 179 | 175 | 175 | 175 | 175 |
| *Dureza Vickers* | 216 | 180 | 165 | 162 | 162 | 162 | 162 |

## Probeta # 9 :

| *Distancia desde el borde(mm.)* | *0* | *0.1* | *0.15* | *0.2* | *0.25* | *0.3* | *0.35* | *0.41* | *0.45* | *0.51* | *0.56* | *0.61* | *0.86* | *1.1* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Diagonal (u.m.)* | 221 | 265 | 226 | 225 | 232 | 250 | 250 | 235 | 261 | 248 | 245 | 250 | 250 | 250 |
| *Dureza Knoop* | 203 | 141 | 194 | 196 | 184 | 158 | 158 | 179 | 145 | 161 | 165 | 158 | 158 | 158 |
| *Dureza Vickers* | 185 | 127 | 176 | 180 | 169 | 144 | 144 | 165 | 132 | 147 | 150 | 144 | 144 | 144 |

## Probeta # 10 :

| *Distancia desde el borde(mm.)* | *0* | *0.05* | *0.1* | *0.15* | *0.2* | *0.25* | *0.3* | *0.35* | *0.41* | *0.45* | *0.51* | *0.56* | *0.81* | *1.1* | *1.32* | *1.57* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Diagonal (u.m.)* | 239 | 216 | 216 | 226 | 223 | 230 | 225 | 228 | 228 | 221 | 232 | 232 | 244 | 249 | 250 | 250 |
| *Dureza Knoop* | 173 | 212 | 212 | 194 | 199 | 187 | 196 | 191 | 191 | 203 | 184 | 184 | 166 | 160 | 158 | 158 |
| *Dureza Vickers* | 159 | 195 | 195 | 180 | 185 | 172 | 180 | 176 | 176 | 185 | 169 | 169 | 153 | 147 | 144 | 144 |

## Probeta # 11 :

| *Distancia desde el borde(mm.)* | *0* | *0.05* | *0.1* | *0.15* | *0.2* | *0.25* | *0.3* | *0.35* | *0.41* | *0.45* | *0.51* | *0.56* | *0.61* | *0.66* | *0.71* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Diagonal (u.m.)* | 200 | 204 | 212 | 219 | 222 | 225 | 230 | 232 | 238 | 241 | 238 | 238 | 248 | 248 | 248 |
| *Dureza Knoop* | 248 | 238 | 220 | 207 | 201 | 196 | 187 | 184 | 175 | 171 | 175 | 175 | 161 | 161 | 161 |
| *Dureza Vickers* | 234 | 222 | 205 | 190 | 185 | 180 | 172 | 169 | 162 | 156 | 162 | 162 | 147 | 147 | 147 |

## Probeta # 12 :

| *Distancia desde el borde(mm.)* | *0* | *0.05* | *0.1* | *0.15* | *0.2* | *0.25* | *0.3* | *0.56* | *0.81* | *1.1* | *1.32* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Diagonal (u.m.)* | 213 | 219 | 228 | 235 | 225 | 234 | 238 | 242 | 242 | 242 | 242 |
| *Dureza Knoop* | 218 | 207 | 191 | 179 | 196 | 181 | 175 | 175 | 169 | 169 | 169 |
| *Dureza Vickers* | 200 | 190 | 176 | 165 | 180 | 165 | 162 | 162 | 156 | 156 | 156 |

## Probeta # 13 Cara A :[12]

| *Distancia desde el borde(mm.)* | *0* | *0.05* | *0.1* | *0.15* | *0.2* | *0.25* | *0.3* | *0.35* | *0.41* | *0.66* | *0.91* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Diagonal (u.m.)* | 224 | 230 | 235 | 239 | 239 | 236 | 244 | 247 | 245 | 245 | 245 |
| *Dureza Knoop* | 197 | 187 | 179 | 173 | 173 | 178 | 166 | 162 | 165 | 165 | 165 |
| *Dureza Vickers* | 180 | 172 | 165 | 159 | 159 | 165 | 153 | 147 | 150 | 150 | 150 |

## Probeta # 13 Cara B :

| *Distancia desde el borde(mm.)* | *0* | *0.05* | *0.1* | *0.152* | *0.2* | *0.25* | *0.5* | *0.762* | *1.01* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Diagonal (u.m.)* | 218 | 249 | 235 | 235 | 239 | 250 | 247 | 250 | 250 |
| *Dureza Knoop* | 208 | 160 | 179 | 179 | 173 | 158 | 162 | 158 | 158 |
| *Dureza Vickers* | 190 | 147 | 165 | 165 | 159 | 144 | 147 | 144 | 144 |

[12] En esta probeta se realizo el tratamiento sin usar el portaprobetas, por ello la cara A de la probeta 13 es aquella que estuvo frente a la descarga luminiscente y la cara B es la opuesta.

## APENDICE

A continuación, en las siguientes tablas, se listan los datos para el trazado de las figuras 3-2, 3-3, 3-4, 3-5 , 3-6 y 3-7.

| *VOLTAJE AL QUE SE INICIA LA DESCARGA LUMINISCENTE (V)* | *PRODUCTO p * d (cm * mmHg)* |
|---|---|
| 8150 | 480.24 |
| 7900 | 469.8 |
| 7820 | 464.58 |
| 7660 | 459.36 |
| 7500 | 448.92 |
| 7210 | 438.48 |
| 7680 | 428.04 |
| 7000 | 428.04 |
| 6750 | 428.04 |
| 7010 | 422.82 |
| 6910 | 417.6 |
| 8090 | 417.6 |
| 6360 | 417.6 |
| 7170 | 407.16 |
| 6980 | 407.16 |
| 7230 | 401.94 |
| 6180 | 391.5 |
| 7000 | 391.5 |
| 6920 | 391.5 |
| 6450 | 375.84 |
| 6800 | 375.84 |
| 6700 | 365.4 |
| 6270 | 365.4 |
| 5570 | 365.4 |
| 6440 | 360.18 |
| 6480 | 354.96 |
| 6380 | 349.74 |
| 6360 | 344.52 |
| 5640 | 344.52 |
| 4600 | 339.3 |
| 6110 | 334.08 |

**Tabla 3.5.** Datos para obtener la curva de Paschen para valores del producto p * d superiores a 20 cm*mmHg . Las condiciones fueron las siguientes: distancia interelectródica 52.2 cm, resistencia limitadora de 614 kΩ. Estos datos originan la figura 3-2. Continúa en la siguiente página.

| | |
|---|---|
| 5540 | 328.86 |
| 5870 | 323.64 |
| 5230 | 323.64 |
| 5860 | 318.42 |
| 4080 | 313.2 |
| 5900 | 313.2 |
| 4480 | 307.98 |
| 3960 | 297.54 |
| 5410 | 292.32 |
| 5120 | 292.32 |
| 4790 | 287.1 |
| 4310 | 281.88 |
| 5340 | 276.66 |
| 5600 | 271.44 |
| 5180 | 266.22 |
| 5220 | 266.22 |
| 4920 | 261 |
| 5070 | 261 |
| 4820 | 255.78 |
| 5220 | 250.56 |
| 5230 | 245.34 |
| 4600 | 245.34 |
| 4280 | 234.9 |
| 4750 | 224.46 |
| 4060 | 219.24 |
| 4440 | 219.24 |
| 4500 | 214.02 |
| 3884 | 208.8 |
| 4330 | 208.8 |
| 4390 | 203.58 |
| 3735 | 198.36 |
| 4008 | 198.36 |
| 4110 | 193.14 |
| 3965 | 187.92 |
| 3520 | 182.7 |
| 3428 | 177.48 |
| 3583 | 172.26 |
| 3360 | 172.26 |
| 3215 | 167.04 |
| 3344 | 156.6 |
| 3020 | 156.6 |
| 2968 | 151.38 |
| 3025 | 151.38 |
| 3098 | 146.16 |

**Tabla 3.5.** Datos para obtener la curva de Paschen para valores del producto p * d superiores a 20 cm*mmHg . Las condiciones fueron las siguientes: distancia interelectródica 52.2 cm, resistencia limitadora de 614 kΩ. Estos datos originan la figura 3-2. Continúa en la siguiente página.

| | |
|---|---|
| 2666 | 140.94 |
| 2740 | 135.72 |
| 2530 | 130.5 |
| 2756 | 130.5 |
| 3008 | 120.06 |
| 2359 | 114.84 |
| 2369 | 114.84 |
| 2439 | 114.84 |
| 2206 | 109.62 |
| 2130 | 104.4 |
| 2543 | 99.18 |
| 2156 | 99.18 |
| 2035 | 93.96 |
| 2092 | 93.96 |
| 2210 | 88.74 |
| 2018 | 78.3 |
| 1893 | 78.3 |
| 2025 | 62.64 |
| 1602 | 62.64 |
| 1875 | 57.42 |
| 1884 | 57.42 |
| 1666 | 52.2 |
| 1617 | 52.2 |
| 1585 | 52.2 |
| 1577 | 46.98 |
| 1634 | 41.76 |
| 1539 | 36.54 |
| 1622 | 36.54 |
| 1606 | 31.32 |
| 1655 | 31.32 |
| 1666 | 31.32 |
| 1712 | 31.32 |
| 1606 | 26.1 |
| 1545 | 26.1 |

**Tabla 3.5.** Datos para obtener la curva de Paschen para valores del producto p * d superiores a 20 cm*mmHg . Las condiciones fueron las siguientes: distancia interelectródica 52.2 cm, resistencia limitadora de 614 kΩ. Estos datos originan la figura 3-2.

| *VOLTAJE AL QUE SE INICIA LA LUMINISCENCIA (V)* | *PRODUCTO pxd (cm*mmHg)* |
|---|---|
| 520 | 20 |
| 509 | 19.5 |
| 480 | 19.25 |
| 530 | 18.8 |
| 570 | 18.55 |
| 524 | 18.5 |
| 530 | 17.55 |
| 580 | 17.25 |
| 489 | 17 |
| 520 | 16.5 |
| 518 | 16.25 |
| 545 | 15.5 |
| 524 | 15 |
| 550 | 14.5 |
| 526 | 13.5 |
| 550 | 12.5 |
| 515 | 11.5 |
| 530 | 11 |
| 540 | 10.25 |
| 520 | 9.5 |
| 521 | 9 |
| 505 | 8.5 |
| 474 | 8.5 |
| 505 | 7.5 |
| 467 | 7 |
| 492 | 6.5 |
| 504 | 6 |
| 475 | 5.5 |
| 436 | 5 |
| 416 | 4.5 |
| 434 | 4 |
| 432 | 3.5 |
| 419 | 3 |
| 402 | 2.5 |
| 405 | 2 |
| 383 | 1.8 |
| 378 | 1.6 |
| 373 | 1.55 |
| 366 | 1.5 |
| 372 | 1.45 |
| 363 | 1.35 |

**Tabla 3.6**. Datos para obtener la curva de Paschen para valores del producto p * d inferiores a 20 cm*mmHg . Las condiciones fueron las siguientes: distancia interelectródica 0.5 cm, una resistencia limitadora de 50 kΩ. Estos datos originan la figura 3-3. Continúa en la siguiente página.

| | |
|---|---|
| 363 | 1.35 |
| 358 | 1.15 |
| 354 | 1.1 |
| 352 | 1.05 |
| 354 | 1 |
| 367 | 0.95 |
| 350 | 0.9 |
| 345 | 0.85 |
| 351 | 0.75 |
| 348 | 0.65 |
| 360 | 0.6 |
| 343 | 0.55 |
| 354 | 0.5 |
| 408 | 0.35 |
| 464 | 0.3 |
| 440 | 0.1 |
| 459 | 0.05 |

**Tabla 3.6.** Datos para obtener la curva de Paschen para valores del producto p * d inferiores a 20 cm*mmHg . Las condiciones fueron las siguientes: distancia interelectródica 0.5 cm, una resistencia limitadora de 50 kΩ. Estos datos originan la figura 3-3.

| *RESISTENCIA (KΩ)* | *VOLTAJE*[1] *(V)* |
|---|---|
| 68.2 | 1610 |
| 137.1 | 1707.67 |
| 205.5 | 1734.33 |
| 273.8 | 1749 |
| 341.9 | 1703.67 |
| 412.1 | 1730.67 |
| 480.1 | 1750.33 |
| 549.1 | 1771 |
| 615.1 | 1697 |
| 1092.1 | 1687.33 |

**Tabla 3.7.** Variación del voltaje, al cual se inicia la descarga luminiscente, al variar la resistencia limitadora del circuito externo; se trabajó con 1.5 mmHg y 52.2 cm entre electrodos. Estos datos dan origen a la figura **3-4**.

[1] Valores promediados

| *RESISTENCIA (KΩ)* | *CORRIENTE[2] (mA)* |
|---|---|
| 68.2 | 7.434 |
| 137.1 | 4.065 |
| 205.5 | 3.039 |
| 273.8 | 2.792 |
| 341.9 | 1.976 |
| 412.1 | 1.492 |
| 480.1 | 1.324 |
| 549.1 | 1.18 |
| 615.1 | 1.01 |
| 1092.1 | 0.7319 |

**Tabla 3.8.** Variación de la corriente, a la cual se inicia la descarga luminiscente, al variar la resistencia limitadora del circuito externo; se trabajó con 1.5 mmHg y 52.2 cm entre electrodos. Estos datos dan origen a la figura **3-5**.

| *VOLTAJE DE FUENTE (V)* | *VOLTAJE A LOS TERMINALES DEL TUBO (V)* | *CORRIENTE (mA)* |
|---|---|---|
| 30 | 30 | - |
| 60 | 60 | - |
| 90 | 90 | - |
| 101 | 101 | - |
| 131 | 131 | - |
| 161 | 161 | - |
| 191 | 191 | - |
| 201 | 201 | - |
| 232 | 232 | - |
| 262 | 262 | - |
| 292 | 292 | - |
| 302 | 302 | - |
| 332 | 332 | - |
| 362 | 362 | - |
| 392 | 392 | - |
| 403 | 403 | - |

**Tabla 3.9.** Datos de la variación de la corriente al aumentar el voltaje, antes de iniciarse la descarga luminiscente. Las condiciones fueron las siguientes: 1.5 mmHg, distancia interelectródica 52.2 cm y una resistencia limitadora de 614 kΩ. Estos datos originan la figura 3-6. Continúa en la siguiente página.

[2] Valores promediados

| | | |
|---|---|---|
| 433 | 433 | - |
| 463 | 463 | - |
| 493 | 493 | - |
| 504 | 503 | 0.002 |
| 534 | 534 | - |
| 564 | 564 | - |
| 595 | 594 | 0.002 |
| 605 | 604 | 0.002 |
| 635 | 634 | 0.002 |
| 665 | 665 | - |
| 695 | 695 | - |
| 705 | 705 | - |
| 736 | 735 | 0.002 |
| 766 | 765 | 0.002 |
| 796 | 796 | - |
| 806 | 806 | - |
| 836 | 836 | - |
| 867 | 867 | - |
| 897 | 896 | 0.002 |
| 907 | 907 | - |
| 937 | 937 | - |
| 968 | 968 | - |
| 998 | 998 | - |
| 1008 | 1007 | 0.002 |
| 1038 | 1038 | - |
| 1068 | 1068 | - |
| 1099 | 1098 | 0.002 |
| 1109 | 1109 | - |
| 1139 | 1138 | 0.002 |
| 1169 | 1169 | - |
| 1199 | 1199 | - |
| 1210 | 1209 | 0.002 |
| 1240 | 1239 | 0.002 |
| 1270 | 1269 | 0.002 |
| 1300 | 1299 | 0.002 |
| 1310 | 1310 | - |
| 1341 | 1340 | 0.002 |
| 1371 | 1370 | 0.002 |
| 1401 | 1400 | 0.002 |
| 1411 | 1410 | 0.002 |
| 1472 | 1471 | 0.002 |
| 1502 | 1501 | 0.002 |
| 1512 | 1511 | 0.002 |
| 1542 | 1541 | 0.002 |
| 1572 | 1571 | 0.002 |

**Tabla 3.9.** Datos de la variación de la corriente al aumentar el voltaje, antes de iniciarse la descarga luminiscente. Las condiciones fueron las siguientes: 1.5 mmHg, distancia interelectródica 52.2 cm y una resistencia limitadora de 614 kΩ. Estos datos originan la figura 3-6 Continua en la siguiente página.

| | | |
|---|---|---|
| 1603 | 1602 | 0.002 |
| 1613 | 1612 | 0.002 |
| 1643 | 1642 | 0.002 |
| 1673 | 1672 | 0.002 |
| 1704 | 1702 | 0.003 |
| 1714 | 1713 | 0.002 |
| 1744 | 1743 | 0.002 |
| 1774 | 1773 | 0.002 |
| 1804 | 1803 | 0.002 |
| 1814 | 1813 | 0.002 |
| 1845 | 1844 | 0.002 |
| 1875 | 1874 | 0.002 |
| 1905 | 1904 | 0.002 |
| 1915 | 1914 | 0.002 |
| 1946 | 1944 | 0.003 |
| 1976 | 1975 | 0.002 |
| 2006 | 2005 | 0.002 |
| 2016 | 2015 | 0.002 |
| 2046 | 2045 | 0.002 |
| 2077 | 2075 | 0.003 |
| 2107 | 2106 | 0.002 |
| 2117 | 2116 | 0.002 |
| 2147 | 2146 | 0.002 |
| 2177 | 2176 | 0.002 |
| 2208 | 2206 | 0.003 |
| 2218 | 2216 | 0.003 |
| 2248 | 2247 | 0.002 |
| 2278 | 2277 | 0.002 |

**Tabla 3.9**. Datos de la variación de la corriente al aumentar el voltaje, antes de iniciarse la descarga luminiscente. Las condiciones fueron las siguientes: 1.5 mmHg, distancia interelectródica 52.2 cm y una resistencia limitadora de 614 kΩ. Estos datos originan la figura 3-6

| *VOLTAJE DE FUENTE (V)* | *VOLTAJE DURANTE LA DESCARGA LUMINISCENTE (V)* | *CORRIENTE (mA)* |
|---|---|---|
| 2319 | 1617 | 1.143 |
| 2349 | 1601 | 1.218 |
| 2379 | 1675 | 1.147 |
| 2409 | 1661 | 1.218 |
| 2419 | 1655 | 1.244 |
| 2450 | 1647 | 1.308 |
| 2480 | 1640 | 1.368 |
| 2510 | 1634 | 1.427 |
| 2520 | 1629 | 1.451 |
| 2551 | 1622 | 1.513 |
| 2581 | 1615 | 1.573 |
| 2611 | 1610 | 1.630 |
| 2621 | 1605 | 1.655 |
| 2651 | 1602 | 1.708 |
| 2682 | 1598 | 1.765 |
| 2712 | 1594 | 1.821 |
| 2722 | 1591 | 1.842 |
| 2752 | 1588 | 1.896 |
| 2782 | 1586 | 1.948 |
| 2813 | 1583 | 2.003 |
| 2823 | 1582 | 2.021 |
| 2853 | 1580 | 2.073 |
| 2883 | 1578 | 2.125 |
| 2913 | 1576 | 2.178 |
| 2924 | 1575 | 2.197 |
| 2954 | 1573 | 2.249 |
| 2984 | 1572 | 2.300 |
| 3014 | 1570 | 2.352 |
| 3024 | 1570 | 2.368 |
| 3055 | 1569 | 2.420 |
| 3085 | 1567 | 2.472 |
| 3115 | 1566 | 2.523 |
| 3125 | 1565 | 2.541 |
| 3155 | 1563 | 2.593 |
| 3186 | 1562 | 2.645 |
| 3216 | 1560 | 2.697 |
| 3226 | 1559 | 2.715 |
| 3256 | 1558 | 2.765 |

**Tabla 3.10.** Variación de la corriente al aumentar el voltaje durante la descarga luminiscente. Las condiciones fueron las siguientes: 1.5 mmHg, distancia interelectródica 52.2 cm y una resistencia limitadora de 614 kΩ. Estos datos originan la figura 3-7. Continúa en la siguiente página.

| | | |
|---|---|---|
| 3287 | 1557 | 2.818 |
| 3317 | 1556 | 2.868 |
| 3327 | 1555 | 2.886 |
| 3357 | 1554 | 2.936 |
| 3387 | 1553 | 2.987 |
| 3418 | 1551 | 3.041 |
| 3428 | 1550 | 3.059 |
| 3458 | 1550 | 3.107 |
| 3488 | 1549 | 3.158 |
| 3518 | 1545 | 3.213 |
| 3529 | 1544 | 3.233 |
| 3559 | 1543 | 3.283 |
| 3589 | 1542 | 3.334 |
| 3619 | 1541 | 3.384 |
| 3629 | 1540 | 3.402 |
| 3660 | 1538 | 3.456 |
| 3690 | 1537 | 3.507 |
| 3720 | 1536 | 3.557 |
| 3730 | 1535 | 3.575 |
| 3761 | 1535 | 3.625 |
| 3791 | 1534 | 3.676 |
| 3821 | 1534 | 3.725 |
| 3831 | 1533 | 3.743 |
| 3861 | 1533 | 3.792 |
| 3892 | 1532 | 3.844 |
| 3922 | 1532 | 3.893 |
| 3932 | 1532 | 3.909 |
| 3962 | 1531 | 3.959 |
| 3992 | 1531 | 4.008 |
| 4023 | 1531 | 4.059 |
| 4033 | 1531 | 4.075 |
| 4063 | 1533 | 4.121 |
| 4066 | 1533 | 4.125 |
| 4080 | 1532 | 4.150 |
| 4090 | 1532 | 4.166 |
| 4140 | 1533 | 4.246 |
| 4180 | 1534 | 4.309 |
| 4190 | 1534 | 4.326 |
| 4240 | 1535 | 4.406 |
| 4290 | 1537 | 4.484 |
| 4340 | 1539 | 4.562 |
| 4390 | 1541 | 4.640 |

**Tabla 3.10**. Variación de la corriente al aumentar el voltaje durante la descarga luminiscente. Las condiciones fueron las siguientes: 1.5 mmHg, distancia interelectródica 52.2 cm y una resistencia limitadora de 6I4 kΩ. Estos datos originan la figura 3-7. Continúa en la siguiente página.

| | | |
|---|---|---|
| 4440 | 1543 | 4.718 |
| 4490 | 1546 | 4.795 |
| 4540 | 1548 | 4.873 |
| 4590 | 1551 | 4.950 |
| 4640 | 1554 | 5.026 |
| 4690 | 1558 | 5.101 |
| 4740 | 1563 | 5.174 |
| 4790 | 1565 | 5.252 |
| 4840 | 1566 | 5.332 |
| 4990 | 1565 | 5.578 |
| 5040 | 1562 | 5.664 |
| 5090 | 1561 | 5.748 |
| 5140 | 1559 | 5.832 |
| 5190 | 1559 | 5.914 |
| 5240 | 1558 | 5.997 |
| 5290 | 1558 | 6.078 |
| 5340 | 1559 | 6.158 |
| 5390 | 1559 | 6.239 |
| 5440 | 1560 | 6.319 |
| 5490 | 1561 | 6.399 |
| 5540 | 1564 | 6.476 |
| 5590 | 1565 | 6.555 |
| 5640 | 1566 | 6.635 |
| 5690 | 1569 | 6.712 |
| 5740 | 1570 | 6.792 |
| 5790 | 1570 | 6.873 |
| 5840 | 1575 | 6.946 |
| 5890 | 1578 | 7.023 |
| 5940 | 1580 | 7.101 |
| 5990 | 1586 | 7.173 |
| 6040 | 1590 | 7.248 |
| 6090 | 1595 | 7.321 |
| 6140 | 1598 | 7.397 |
| 6190 | 1602 | 7.472 |
| 6240 | 1607 | 7.546 |
| 6290 | 1613 | 7.617 |
| 6330 | DESCONECCION | |

**Tabla 3.10.** Variación de la corriente al aumentar el voltaje durante la descarga luminiscente. Las condiciones fueron las siguientes: 1.5 mmHg, distancia interelectródica 52.2 cm y una resistencia limitadora de 614 kΩ. Estos datos originan la figura 3-7.

# CAPITULO 4

# RESULTADOS Y CONCLUSIONES

## 4.1 ANALISIS DE RESULTADOS

Para analizar los resultados obtenidos al tratar las probetas con la descarga luminiscente se debió tomar en cuenta las condiciones en las que este tratamiento se realizó con el fin de establecer comparaciones al variar las distintas magnitudes con las que se trabajaron.

Por ello se recurrió a la tabla 3-6 en la cual se detallan las condiciones que se llevaron adelante con cada probeta tratada.

En el capítulo anterior se muestran los datos que se usaron para trazar las figuras que se muestran a continuación. Se debe mencionar que ciertas magnitudes de durezas que se registraron al borde de algunas probetas es un valor menor a los que posteriormente se alcanzan; la explicación está en que la primera indentación para detectar la microdureza se la realizó sobre la capa oscura ( diferente a la capa blanca presente en la nitruración convencional ) que presenta durezas menores a las que posteriormente se registran.

Debe quedar claro que las mediciones de las durezas para cada una de las probetas son valores aproximados y deben servir como referencia para establecer las tendencias que el proceso ha tenido en cada experimento donde se han variado ciertas magnitudes y se han mantenido constantes otras.

La recopilación de una mayor cantidad de mediciones por cada probeta habría permitido llevar adelante un procedimiento estadístico que establezca un mejor análisis de

los resultados obtenidos, no se lo realizó por la disponibilidad restringida del equipo de medición.

Se debe recalcar que este trabajo de investigación se concentró en la construcción del equipo de pruebas #3 y los experimentos tienden principalmente a lograr que efectivamente se produzcan cambios de dureza superficial en las probetas por efecto del tratamiento de nitruracion ionica. Trabajos futuros serán más sistemáticos en cuanto al manejo de las variables y a la optimización del proceso.

A partir de las tablas que contienen los valores de las durezas de las probetas se puede observar que desde el borde hasta 0.5 mm hacia el interior del material, en promedio, el descenso de la dureza es homogéneo, pero a partir de este valor, en algunos casos, la dureza comienza a subir nuevamente en lugar de mantenerse constante; este incremento no ha sido adecuadamente explicado.

Con el objetivo de establecer la tendencia que los valores de las durezas deben tener en cada una de las gráficas que se han establecido, se trazó manualmente una línea discontinua que aclara el descenso que la dureza debe experimentar a medida que penetramos en el material.

Algunas gráficas no presentan valores de dureza para profundidades que si se muestran en otras curvas, ello se debe a que lo datos fueron tomados mientras se presentaron fluctuaciones entre las mediciones consecutivas de las durezas, cuando estas mediciones se mantuvieron constantes se dejaron de medir las durezas.

El criterio que se siguió para establecer comparaciones entre las probetas tratadas, con la descarga luminiscente, fue el de seleccionar una magnitud que varíe para un grupo de probetas, pero cuyas restantes condiciones se mantengan constantes. Por ejemplo la primera comparación que se estableció tuvo que ver con el tiempo de tratamiento; por ello se escogieron las probetas 2, 3 y 4 que tenían similares condiciones de presión, distancia interelectródica y densidad de corriente, pero diferentes tiempos de exposición.

En la figura 4-1 se observa que la probeta tratada con 4.5 horas alcanza inicialmente valores de dureza mayores a las otras dos pero se observa además una fluctuación entre el primero y el segundo valor lo cual no se debe tomar muy en cuenta ya que la tendencia siempre debe ser de durezas mayores a dureza menores a medida que nos adentramos en el interior de la superficie tratada. Con un tiempo de exposición de 6 horas se observa que se obtienen durezas menores.

Se observa algo que no tiene mucho sentido en una de las probetas: a medida que nos adentramos en su interior la dureza va disminuyendo hasta llegar a un mínimo a partir del cual aumenta en lugar de mantenerse en un valor constante que sería lo lógico.

La figura 4-2 se diferencia de la anterior en que las probetas que aquí se comparan (7, 8 y 9) fueron tratadas con densidades de corriente menores y con tiempos de exposición de 8, 10 y 14 horas. Se observa que con tiempos intermedios se alcanzan durezas mayores, ya que nuevamente con un tiempo de tratamiento mayor se alcanzan durezas menores; se puede observar que la dureza del material base es el mismo para dos de las probetas.

... continúa en la página 180.

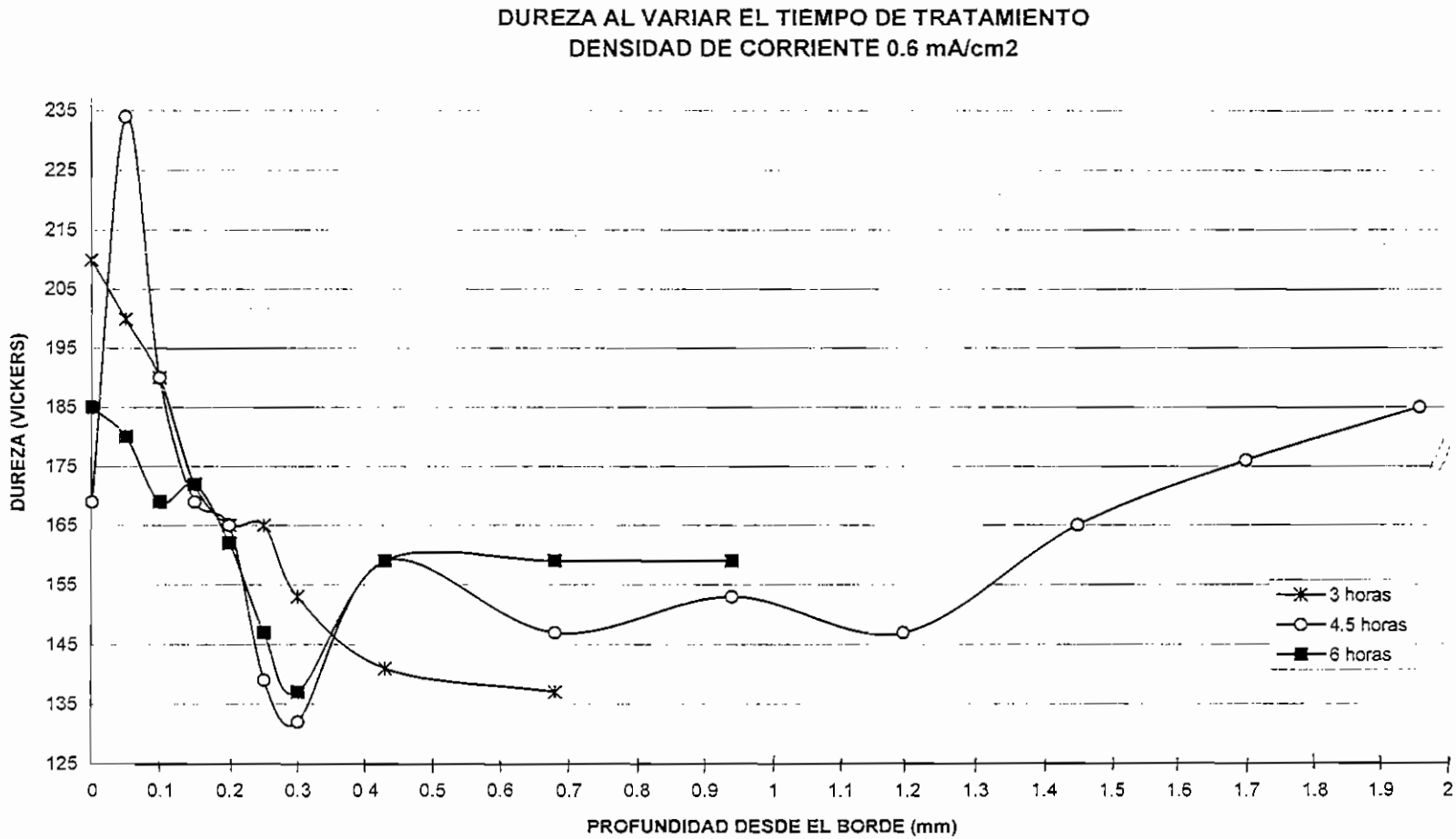



Figura 4-1. Durezas que se consiguieron en las probetas para 3 tiempos de exposición diferentes.

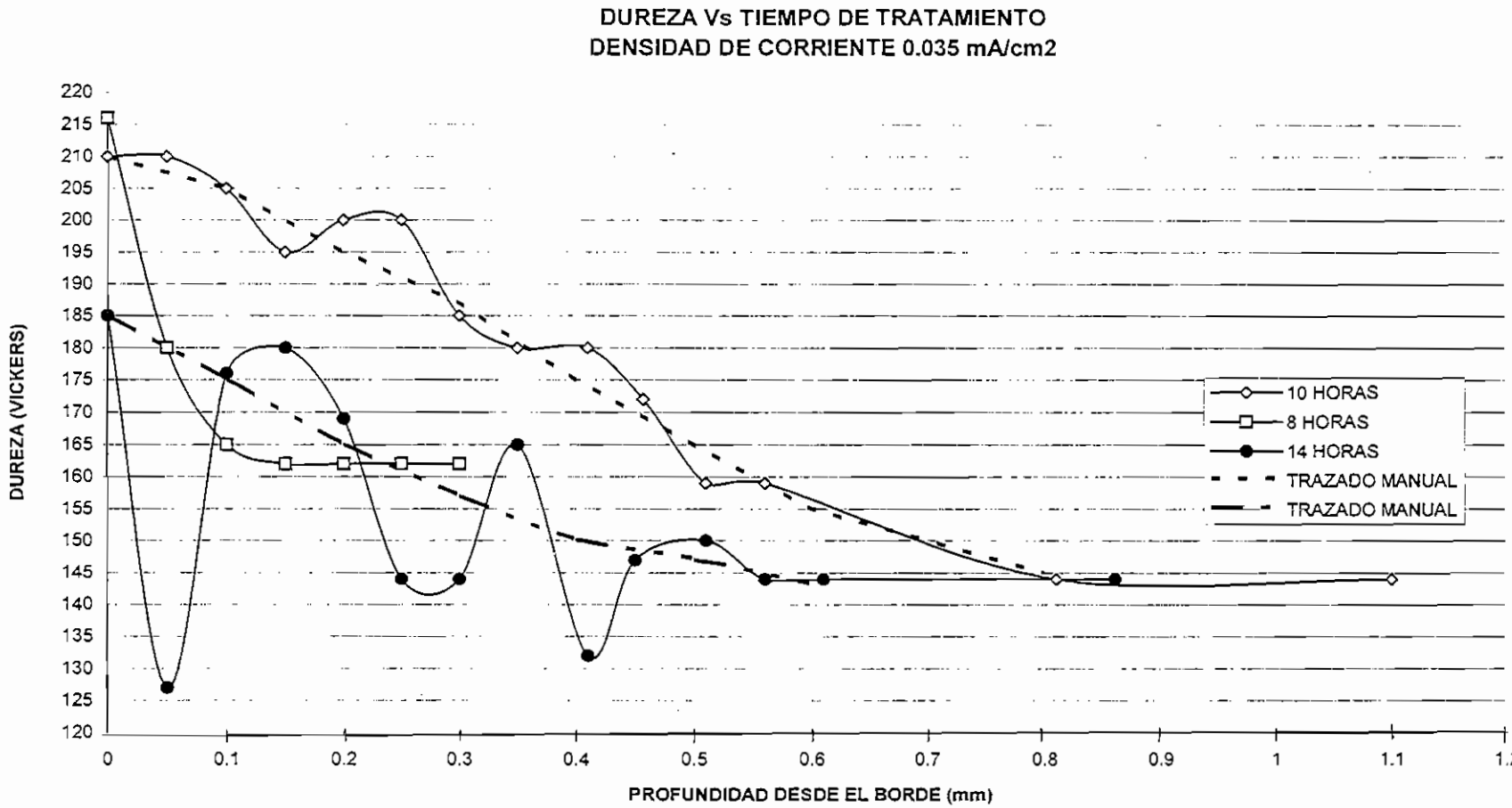



Figura 4-2. Valores de dureza para 8, 10 y 14 horas de exposicion

En la figura 4-3 se observa la variación de la dureza respecto a la densidad de la corriente en tres probetas (4,10 y 12) . La curva que fue tratada con una densidad de corriente menor a las otras dos se alcanzan durezas no tan altas inicialmente, pero éstas van disminuyendo uniformemente.

En la figura 4-4 se aprecia que en un medio lleno de aire la probeta (5) registra valores de dureza mayores que los alcanzados con nitrógeno ( probeta #3 ). Una forma de explicar esto es que el contenido de nitrógeno en la atmósfera es elevado ( 79% ).

La probeta # 5 presenta durezas considerables a medida que se avanza hacia el interior de la misma. Esto quiere decir que a pesar de haberse producido el tratamiento con el uso de aire, el oxígeno no se difundió al interior del material ya que si ello hubiera ocurrido, la dureza del material en lugar de aumentar posiblemente habría disminuido.

Otro dato a tomar en cuenta para el análisis del comportamiento del oxígeno durante el tratamiento es la coloración que han adquirido las piezas luego de la nitruración iónica. Se observa que la probeta # 5 adquirió una coloración café, al igual que las otras probetas a las que se les dió el tratamiento con nitrógeno.

En pequeñas zonas de algunas probetas se observaron manchas azuladas, especialmente en sus bordes, lo cual indica la formación de óxidos de hierro pero esto no occurió con la probeta # 5.

Es decir que, en esta probeta tratada con aire, el oxígeno no tomó contacto con la_

... continúa en la página 183

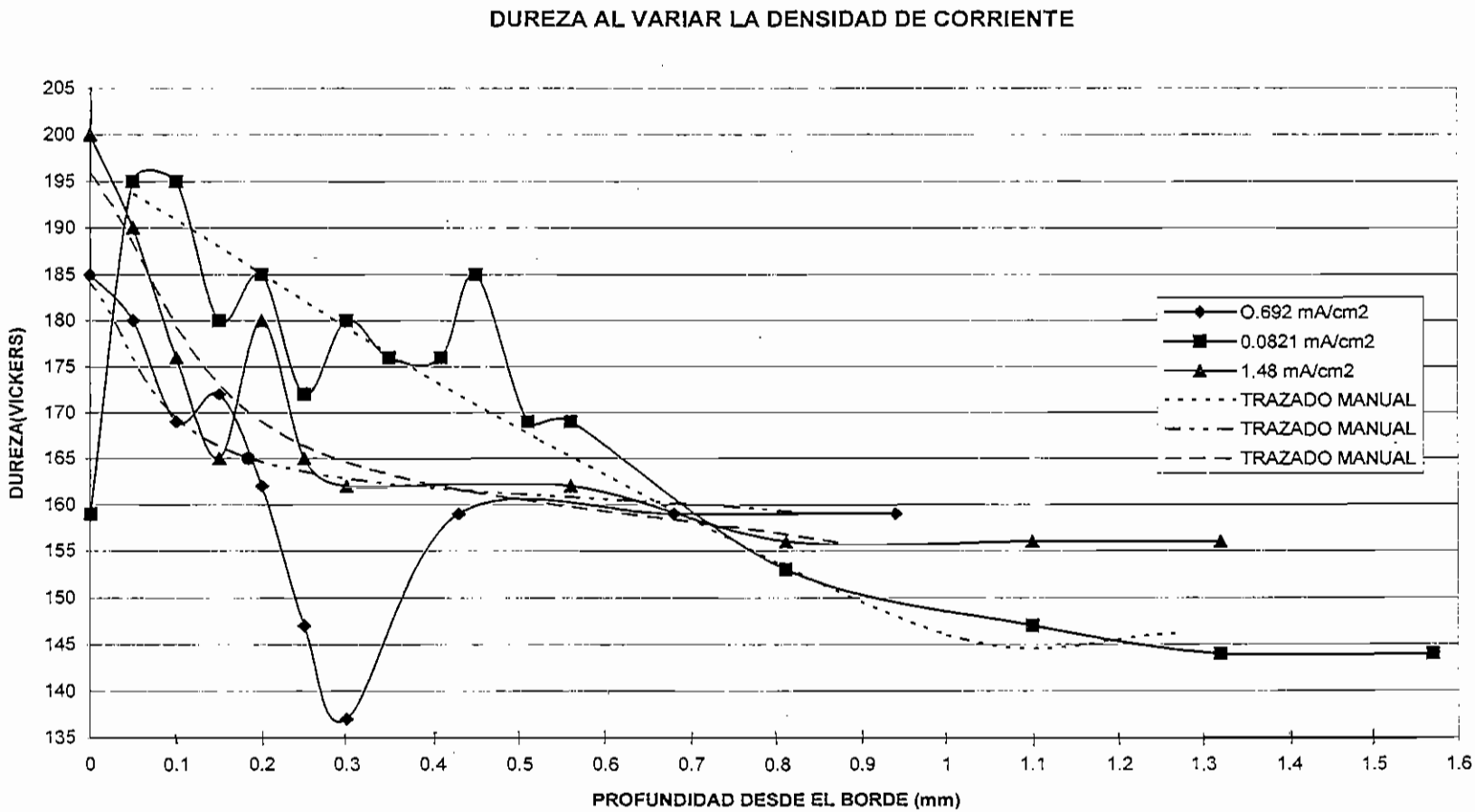



Figura 4-3. Durezas que se alcanzan con distintos valores de la densidad de corriente

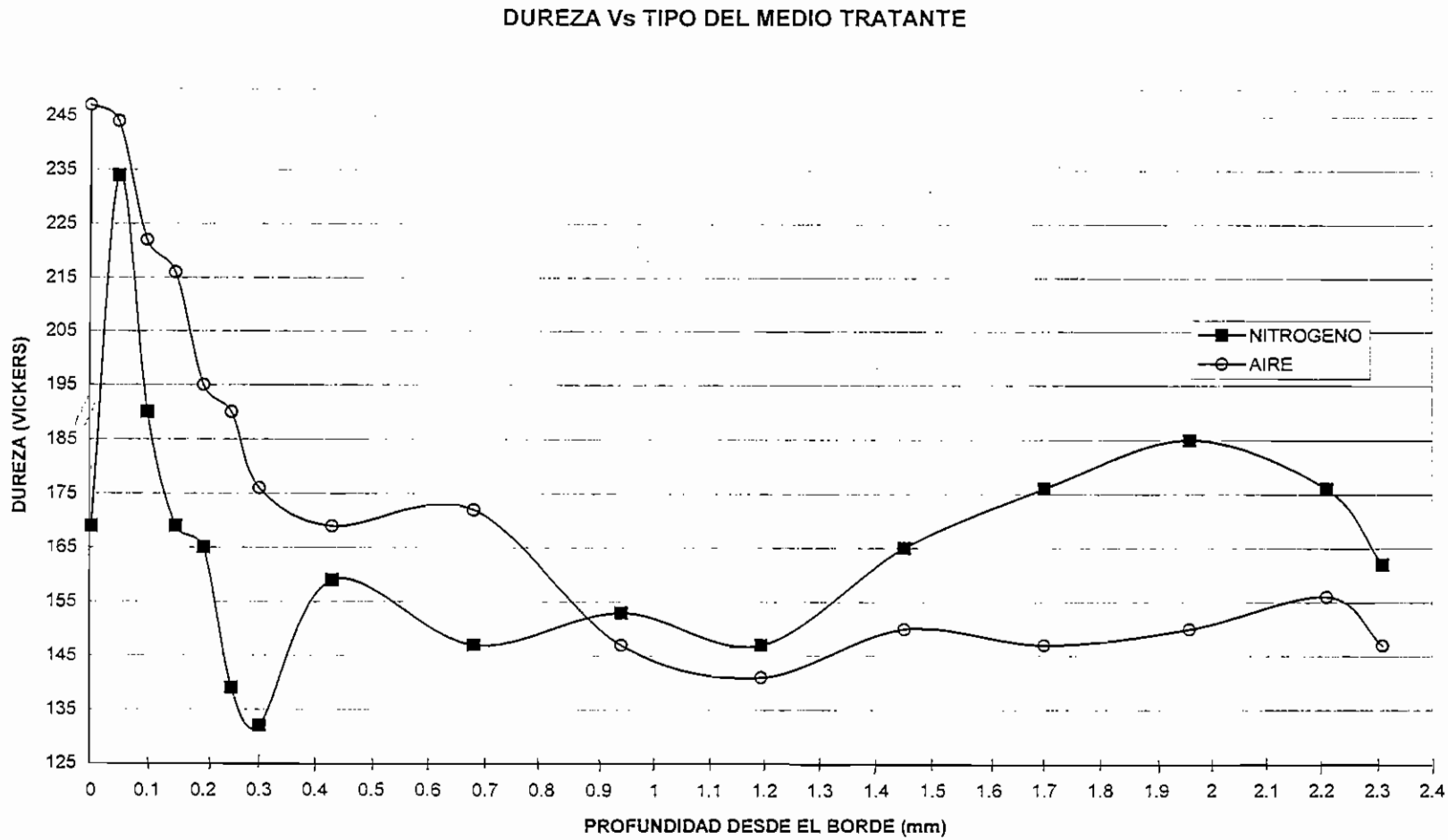



Figura 4-4. En esta gráfica se observa la diferencia entre dos probetas que fueron tratadas en dos medios distintos: nitrógeno y aire.

superficie del material ya que se habrían presentado manchas azuladas en toda la superficie, por un lado, y habría disminuido su dureza por otro; posiblemente formó compuestos con las partículas de hierro que son arrancadas al inicio de la descarga por pulverización catódica y con ello se neutralizó.

La figura 4-5 muestra la incidencia que tiene la distancia entre los electrodos en las durezas alcanzadas en tres probetas (4,10,12). Hay una marcada tendencia en la curva, trazada para una distancia interelectródica de 0.5 cm, a mantener las durezas más altas que para los otros dos casos aunque las durezas que se alcanzan a una mayor profundidad van en aumento lo cual no debería presentarse ya que se dedebia llegar a estabilizar en el valor de dureza del material base.

Con el propósito de determinar la influencia que tiene la homogenidad del campo eléctrico en la dureza de las probetas, se trazó la grafica 4-6. Se tomaron en cuenta las probetas 12 y 13, en el primer caso se uso el portaprobetas y en el segundo caso no.

En la figura 4-6 se observa que las durezas para la probeta tratada con campo homogéneo siempre se mantienen por encima de las alcanzadas para la probeta sin campo homogéneo.

La probeta # 13 recibió un tratamiento sin el uso del portaprobetas, para comparar las durezas que alcanzaron las caras de la misma probeta se trazó la grafica 4-7; en la misma se observa que la cara que estuvo frente al ánodo registra durezas más altas, a pesar que se traslapan las curvas, pero esta tendencia se mantiene.

... continúa en la página 188.

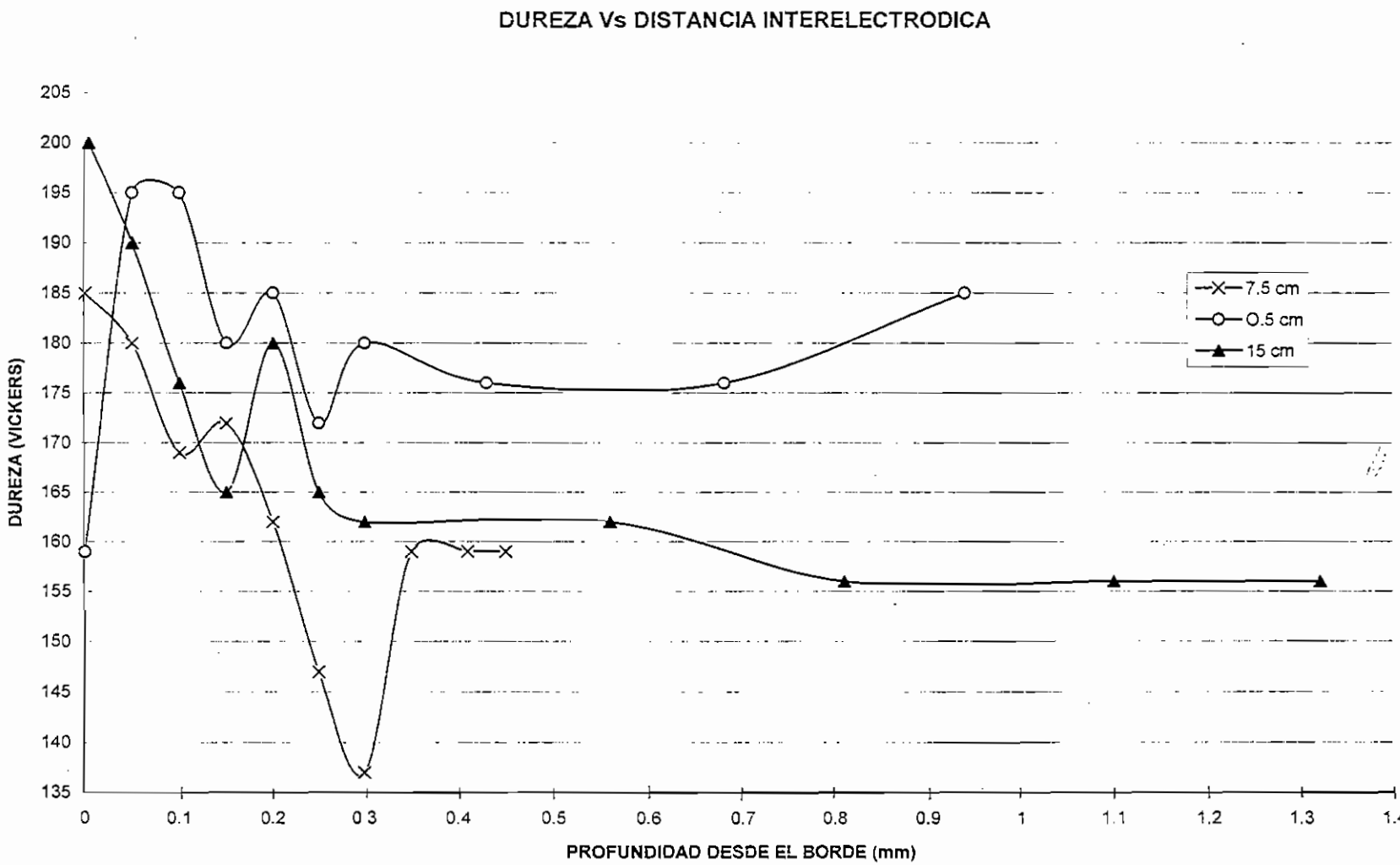



Figura 4-5. Esta grafica muestra la incidencia que tiene la distancia interelectrodica en las durezas de las probeta.

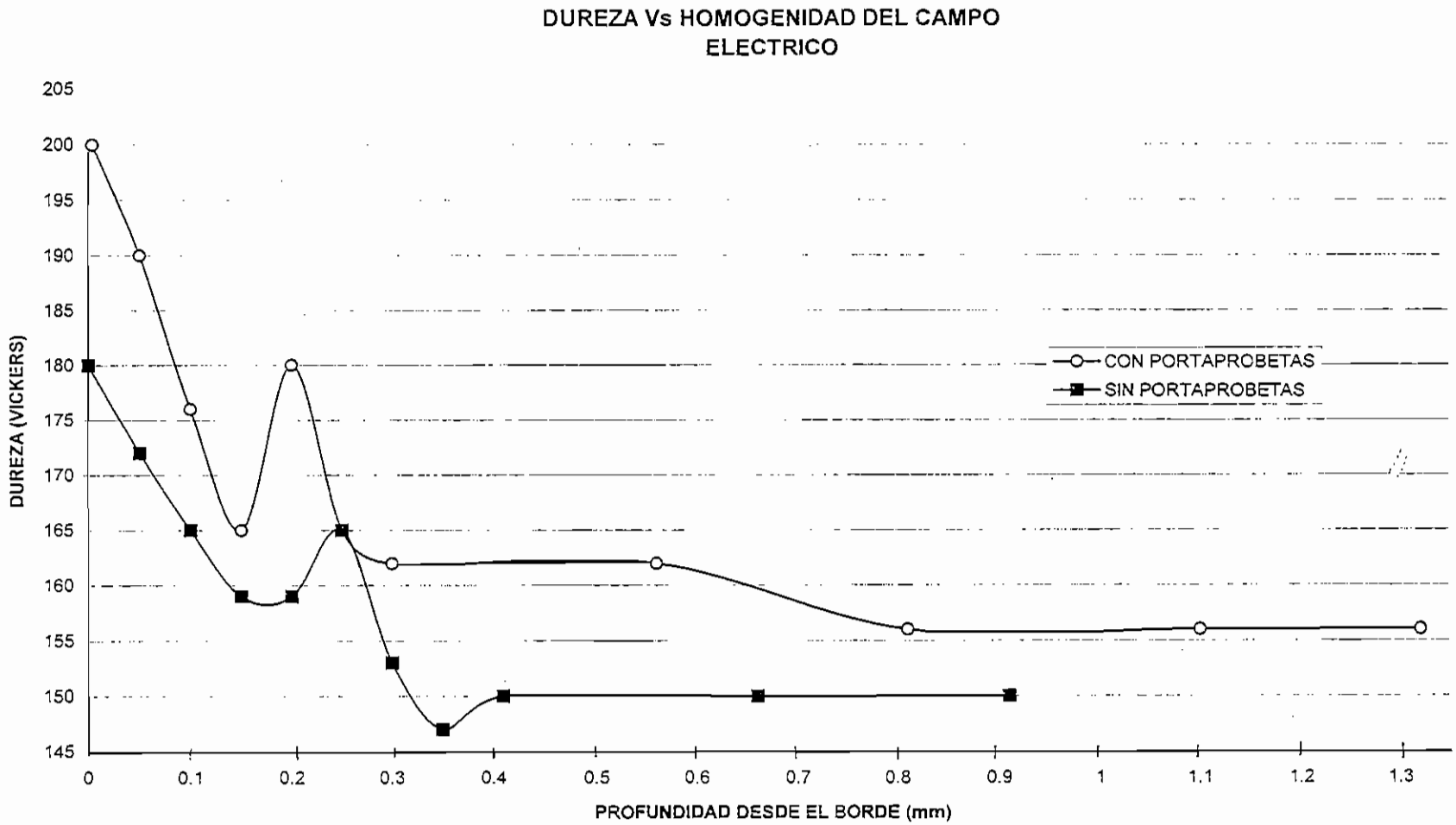



Figura 4-6. En este caso se puede ver como varia la dureza comparada con la homogenidad del campo electrico.

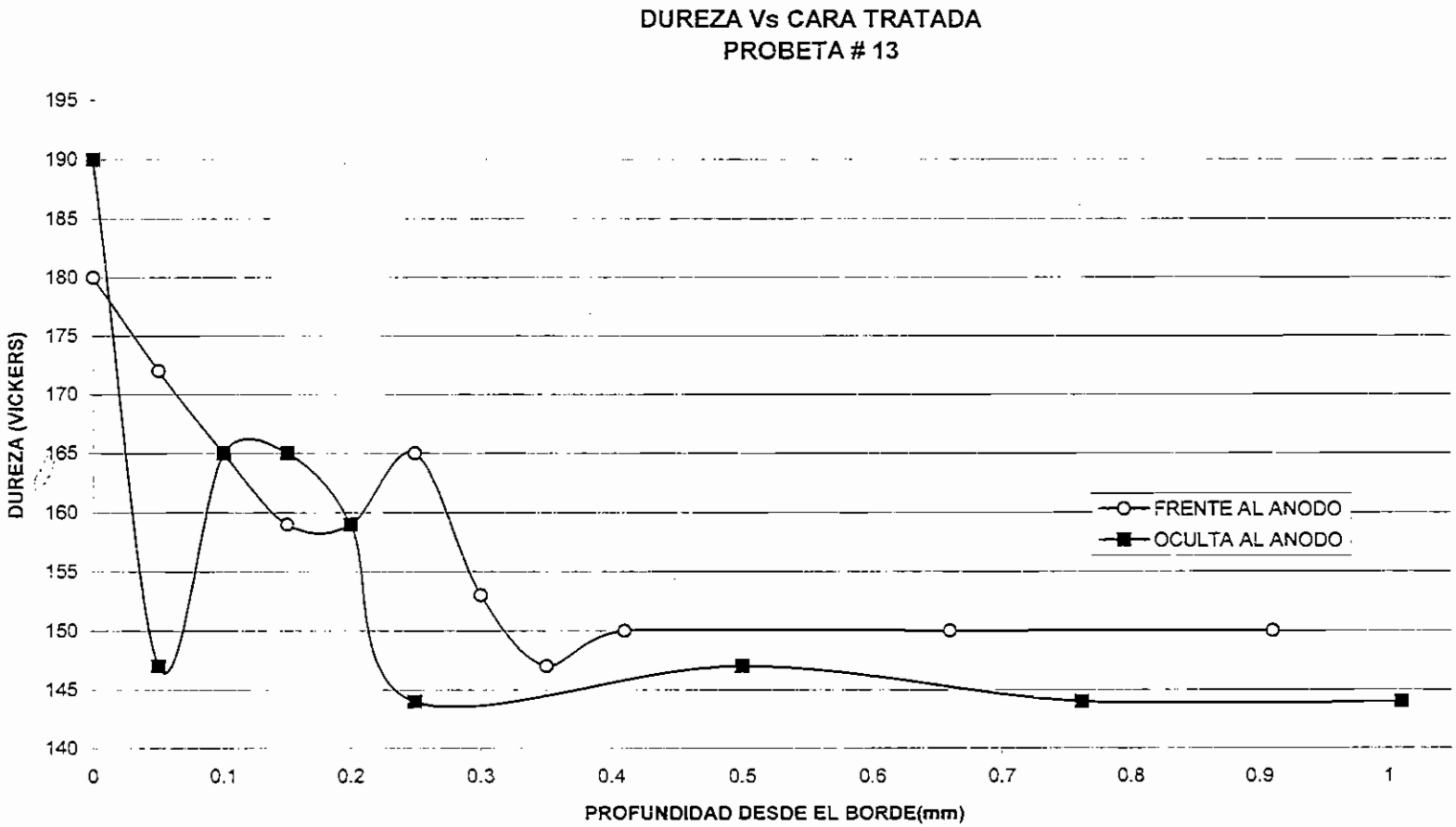



Figura 4-7. En esta gráfica se puede apreciar la diferencias en durezas que se presenta en una misma probeta en caras opuestas, la una frente al ánodo y la otra oculta al mismo. No se uso el portaprobetas.

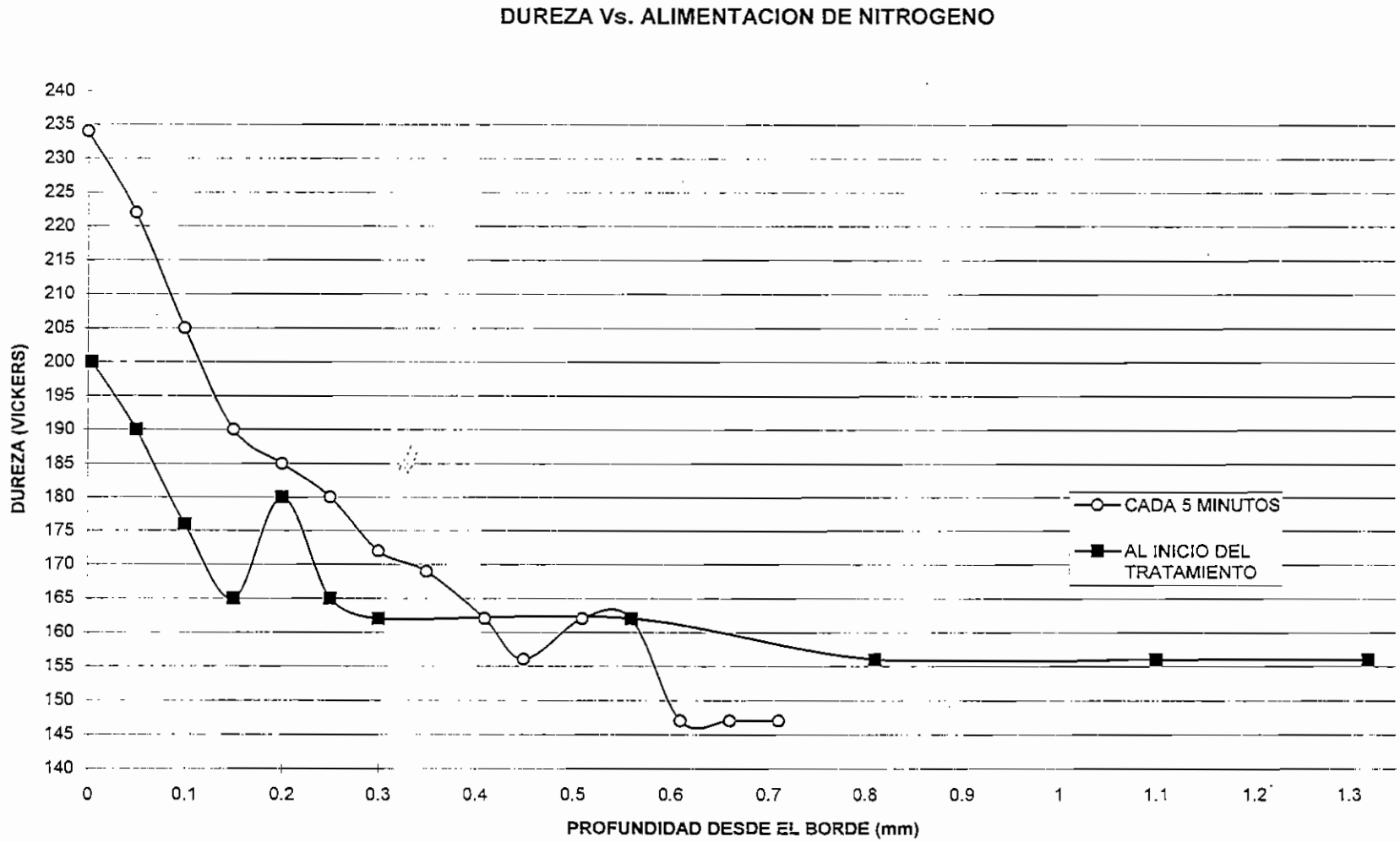
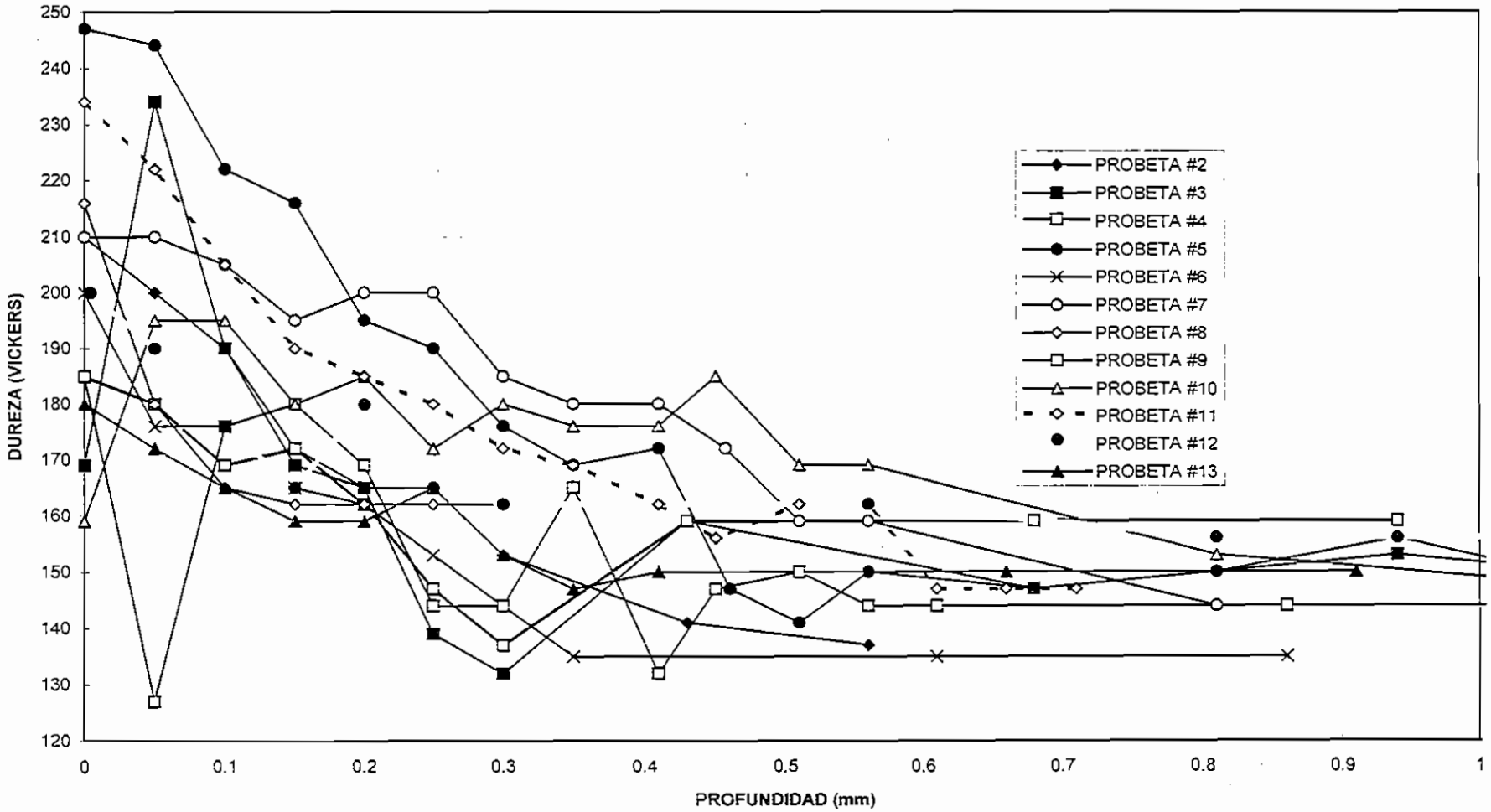



Figura 4-8. En esta gráfica se puede apreciar la influencia del contenido de nitrógeno en la cámara de descargas.

## DUREZAS DE TODAS LAS PROBETAS TRATADAS



La gráfica 4-8 recoge las valores de las durezas que se alcanzaron para dos probetas: la 11 que se trató con una descarga en nitrógeno alimentado cada 5 minutos, y la 12 a la que se alimentó con nitrógeno solamente al inicio.

En esta última gráfica se observa que la probeta que recibió nitrógeno constantemente tiene una tendencia a mantener la dureza a medida que aumenta la profundidad de la superficie tratada, más que en el caso de la probeta 12.

## 4.2 CONCLUSIONES

**1.** Al variar la resistencia limitadora para comenzar la descarga luminiscente se puede concluir que el voltaje al cual inicia la descarga se mantiene casi constante porque como se aprecia en la figura 3-2, el voltaje varía entre 1600 y 1710 por lo tanto se ubica en una banda de 10% de variación con lo cual podemos decir que se mantiene casi constante.

**2.** La corriente a la cual se produce la descarga luminiscente disminuye a medida que aumenta la resistencia limitadora, es decir que la resistencia limitadora controla la corriente a la cual se produce la descarga luminiscente, pero se determinó en otros experimentos que valores muy altos de la resistencia inhiben la realización de la descarga ya que no permiten la circulación de los electrones en la cantidad suficiente para llevar adelante el proceso de la descarga autosostenida.

**3.** Comparando las figuras 3-4 y 3-5 se aprecia que la corriente en la descarga no autosostenida llega a tener valores de unidades de microamperios y al producirse la

descarga autosostenida la corriente se eleva violentamente en casi mil veces porque llega a valores de las unidades de los miliamperios.

**4.** En la figura 3-5 se observa un salto en el voltaje al inicio de la descarga luminiscente. Esto se debe a que las mediciones para obtener esta curva fueron hechas con el uso del equipo Fluke de alto voltaje continuo en el cual el control del voltaje no es uniforme ya que se deben operar los selectores que estan en unidades, decenas, centenas y miles de voltios con lo cual no se puede ir aumentando uniformemente el voltaje.

**5.** A partir de la curva 3-5 se puede estableeer que, para calcular las densidades de corriente normales, la corriente normal de la descarga luminiscente para el nitrógeno varía entre 3 y 5 mA; para un área de 0.5 $\pi$ $cm^2$ (para el electrodo del tubo de descargas # 2) las densidades de corriente normales fluctúan entre 1.9 y 3.2 mA / $cm^2$ ó 19.1 y 31.83 A/ $m^2$.

**6.** La curva de PASCHEN para valores de p*d superiores a 20 cm*mmHg presenta una característica lineal, luego de realizar el ajuste respectivo. Esto no quiere decir que esta tendencia se mantenga a lo largo de esta función, para aclarar esto se trazó la figura 3-7 en la cual se observa que la función tiene fluctuaciones y presenta un mínimo ( y un codo ) en el voltaje de inicio de la descarga luminiscente.

7. Tomando como referencia la tabla 3-6 se puede comprobar que un sistema de electrodos que produce un campo uniforme hace que el voltaje al cual se inicia la descarga sea más alto que aquel sistema que produce campos no uniformes. Para llevar adelante esta comparación la distancia interelectródica debe ser la misma en ambos casos.

**8.** El electrodo denominado tipo cañón fue aquel que de mejor forma condujo la descarga hacia el cátodo. El inicio de la descarga en el ánodo no tuvo alteraciones, fue uniforme y la densidad de corriente más alta que con el uso de otros electrodos.

**9.** Con el propósito de evitar que la descarga luminiscente se produzca en ciertas áreas del cátodo, se procedió a cubrir estos espacios con una cinta aislante (nitto tape), lo cual fue suficiente para evitar que estos espacios intervengan en la luminiscencia. Esta práctica resultó efectiva porque la temperatura superficial de las probetas no ascendió a temperaturas críticas, lo cual habría deteriorado la composición y el desempeño de la cinta.

**10.** Se observó que cuando el voltaje con que se energiza al tubo de descargas es muy rectificado, el voltaje al cual se produce la descarga luminiscente es más alto que cuando la señal tiene componentes solo positivas pero un alto rizado. Es decir que el rizado de la señal favorece el inicio de la descarga luminiscente.

**11.** Al producir la descarga luminiscente sobre la probeta sin el uso del portaprobetas la descarga se produjo en todo el volumen de la pieza salvo en los puntos en los cuales había contacto con la base de aluminio.

**12.** Se observó que con campos homogéneos la descarga luminiscente se inicia con voltajes mas elevados en contraste al uso de campos no homogéneos. Esto se pudo apreciar al variar los electrodos que se usaron como ánodo.

**13.** Se determinó que al disminuir el diámetro del tubo de descargas, manteniendo constante la presión, el tipo de electrodo y la separación entre los electrodos el voltaje, al

cual daba inicio la descarga, disminuía. Además las regiones de la descarga luminiscente se definían de mejor forma cuando el diámetro se reducía; una ventaja de esto puede ser el control sobre la región oscura catódica, que como se sabe es una región con un alto grado de iones positivos e importante en la nitruración iónica.

**14.** Con el tubo el tubo de descargas # 2 se determinó que durante la descarga luminiscente, manteniendo la presión constante (valores entre 4 y 3.5 mmHg.) y aumentando el voltaje, el *plasma* o *columna positiva* ocupó mayor espacio y la luminiscencia catódica cubrió en mayor grado el cátodo, pero el descenso del voltaje no consiguió evidenciar la presencia del *espacio oscuro catódico*. La variación del voltaje tuvo más incidencia en la intensidad de la luminiscencia que en el establecimiento de las distintas regiones de la descarga luminiscente.

**15.** En cambio manteniendo constante el voltaje se fue reduciendo la presión provocando con ello un aumento en la intensidad de la luminiscencia y el aparecimiento de zonas de claridad y oscuridad a lo largo del tubo de descargas, así como se hizo evidente la presencia de la región oscura catódica. Por lo tanto el descenso en la presión hace que aumente el espesor del espacio oscuro catódico, ello significaría que al haber menos partículas en el gas se producen menos choques contra los iones positivos lo cual reduce la cantidad de fotones generados.

**16.** En una de las probetas se pudo comprobar el principio de similitud el cual en uno de sus enunciados se manifiesta que si se mantiene la corriente constante y se disminuye al área de la superficie que interviene en la descarga luminiscente, la densidad de corriente aumenta proporcionalmente con el fin de mantener invariable la corriente.

**17.** En todas las probetas tratadas se puede observar, con ayuda del microscopio metalográfico, que la superficie tratada vista de perfil mantiene una excesiva linealidad que no se consigue por métodos de pulimento convencionales; esto se debe al trabajo de bombardeo de los iones sobre la superficie del cátodo con lo cual se van eliminando sistemáticamente todas aquellas irregularidades en el material hasta dejarlo plano. Esto no se observó en la cara de la probeta a la que se alimentó con nitrógeno cada 5 minutos.

**18.** El ataque de las probetas con sulfuro de cobre no permitió establecer la validez del tratamiento superficial ya que el sulfuro de cobre atacó por igual las caras tratadas y las no tratadas por lo tanto el uso de esta prueba no fue concluyente.

**19.** La dureza medida con indentaciones realizadas perpendicularmente a las piezas tratadas no permitió detectar la dureza de la capa formada debido a que se usó una carga de 60 kilos, con lo cual la impresión que dejó el durómetro sobre el material atravezó la capa tratada y en realidad registró la dureza del material base. Por ello se recurrió al uso de la microdureza en las probetas tratadas.

**20.** En el manual del equipo para determinar las microdurezas de materiales se manifiesta que los errores en las mediciones con este equipo están en ±10 % ; por lo tanto cualquier valor que salga de este margen al medir las indentaciones es un valor de endurecimiento o ablandamiento del material con respecto a la dureza del material original.

**21.** En todas las probetas se produjeron cambios en la dureza del material en mayor o menor grado. Las variaciones de las durezas en el material base pueden deberse a las acciones de rectificado en el momento de confeccionar las probetas en donde al momento

de mecanizarlas se producen elevaciones de temperatura que afectan las características físicas del material.

**22.** La capa oscura que se forma sobre la superficie del metal es una capa difundida y no adosada, a esta conclusión se llega luego de observar las indentaciones que se produjeron sobre la capa donde se ve que la huella es de menor dureza que el material base debido al tamaño de la indentación pero mucho más pequeña que la producida sobre la resina que contiene a la probeta; es decir que la capa oscura es parte del material base pero presenta durezas menores que los se alcanzan en la superficie de éste.

**23.** Las caras tratadas con la descarga luminiscente presentan una coloración café y ciertas probetas tienen pequeñas manchas azuladas. Mediante indentaciones con el microdurómetro sobre estas superficies se estableció que las indentaciones sobre las áreas azuladas (características de un proceso de oxidación) eran mayores que aquellas practicadas sobre las zonas de color café, es decir que en las primeras se presentaron durezas inferiores respecto a las segundas.

**24.** Se puede observar que, así como se presentó un aumento de la dureza en todas las probetas, también se observa, en algunas de éstas, que al adentrarse en el metal se registran valores de dureza inferiores a la dureza del metal base. Esto quiere decir que a pesar que en la superfie se produjo un endurecimiento hacia el interior, en algunos casos, el material se reblandeció; la probeta # 8 que fue tratada con 8 horas presenta una gráfica con durezas en la superficie que van descendiendo uniformemente hasta llegar a las durezas del material base.

**25.** A partir de los valores de las durezas que se registraron en cada una de las probetas se establece que la influencia del tratamiento es evidente hasta una profundidad entre 0.4 a 0:5 mm; luego se presentan variaciones en la dureza del material base, ello puede deberse a que el material base no es homógeneo.

**26.** De la figura 4-4 se puede concluir que el tratamiento con aire produjo durezas mayores que el tratamiento con nitrógeno.

**27.** Se observó que al eliminar el portaprobetas las piezas tratadas sufren el ataque de la descarga luminiscente en todo el volumen. Esto se concluye luego de tomar las microdurezas en las caras de la probeta # 13 que recibió el tratamiento en toda su superficie. Tanto la cara que da hacia el ánodo como la que se oculta de él sufrieron aumentos de dureza.

**28.** Al comparar los valores de dureza alcanzados por las probetas en campos uniformes y en campos no uniformes se puede concluir que los mayores valores de dureza en la probeta con un campo homogéneo se deben a que la descarga se concentró únicamente en una de las caras tratadas, es decir que la densidad de corriente era mayor que en el campo no uniforme.

**29.** La alimentación continua de nitrógeno produjo cambios notorios en la superficie de la cara tratada. Esto se lo puede ver en la gráfica 4-8; los valores de la dureza en la probeta, alimentada continuamente con nitrógeno, se mantienen por encima de los correspondiente obtenidos para la probeta a la que se alimentó con nitrógeno solamente al inicio del tratamiento.

**30.** La dureza máxima alcanzada por el tratamiento de la nitruración iónica sobre las probetas se encuentra en 260 Vickers, y la dureza del material base medida en el material base arroja valores de 140 Vickers (igualmente en promedio), por lo tanto se registran incrementos del 85 % , aunque en promedio es de 46%. Estos valores obtenidos en las probetas tratadas no pueden ser comparadas con otros datos, de nitruración de aceros comunes de bajo contenido en carbono como el usado en las probetas, porque no se hallaron datos al respecto. Incluso en la tabla 2.1 no se expresan las durezas alcanzadas por aceros comunes como el A-36 que se usó en este trabajo.

**31.** La resina de poliester que se usó para la elaboración de la cámara para descargas eléctricas tiene diferentes características de aislamiento dependiendo del tiempo que ha demorado en polimerizarse. Mientras más tiempo demora en secarse (completamente) la resina, más aumenta su capacidad de aislamiento eléctrico; esto se comprobó mediante pruebas, sobre muestras de resina de poliester, con el uso del equipo de alto voltaje.

**32.** Al controlar la temperatura con la cual la resina de poliester se va polimerizando se puede controlar la pigmentación que ésta adquiere. El control de la temperatura del proceso alarga el tiempo de polimerización pero mantiene el color de la mezcla original.

## 4.3 RECOMENDACIONES

**1.** Para continuar con los experimentos se debe mejorar el hermetismo de la cámara de descargas luminiscentes ya que en el momento de hacer el vacío en la cámara es posible

que se produzca el ingreso de oxigeno lo cual, como se ha visto en la parte teórica, con aumento de la temperatura en la superficie del metal (debido a la descarga luminiscente) produce su oxidación formando con ello una barrera que impide la formación de nitruros de hierro.

**2.** La variación de las dimensiones y especialmente de la forma de las piezas tratadas dará un mejor conocimiento del tratamiento de nitruración con descarga luminiscente.

**3.** Las pruebas que se realizaron se llevaron a cabo sobre acero común A-36 que tiene un bajo contenido en carbono ( 0.3 % ) en adelante se deben tener en cuenta aceros con otras composiciones llamados especiales porque sus elementos constituyentes favorecen el fenómeno de la nitruración. (Ver tabla 2.1).

**4.** La descarga debería iniciarse con un alto rizado y una vez que haya comenzado se pueden conectar capacitores para corregir el rizado y mejorar la señal.

**5.** Se debe recurrir al análisis, con un microscópio electrónico, de las probetas tratadas con la descarga luminiscente a fin de determinar los componentes de la capa oscura formada y de la región que se presenta a continuación.

**6.** Es importante estudiar también la dependencia entre la magnitud del rizado que tiene la señal que se usa para producir la descarga luminiscente y la dureza que se obtiene.

7. También se debe establece la importancia que tiene la variación del área del tubo con respecto al espesor de la región oscura catódica y por lo tanto al fenómeno de la nitruración iónica.

8. Para usar el ataque químico, mediante la inmersión de las piezas tratadas en baño de sulfuro de cobre, como prueba para determinar la realización de la nitruración iónica se deben establecer los tiempo necesario para el desarrollo de esta prueba ya que no se hallaron referencias bibliográficas al respecto.

# ANEXOS

ANEXO 1

## CONSTRUCCION DEL TUBO TRANSPARENTE EN RESINA DE POLIESTER PARA LA CAMARA DE DESCARGAS.

Para la elaboración del tubo transparente se escogió inicialmente el acrílico por su resistencia a la presión y porque se puede ver a través del mismo. Se recurrió a la experiencia que tenían en el laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil para el doblado del acrílico a partir de su forma comercial (laminado).

Por ello se encargó la elaboración de un molde cilíndrico en madera de ciprés de 130 mm. de diámetro por 800 mm. de longitud, sobre el cual, en el taller del laboratorio de hidráulica se dobló una plancha de acrílico de 4 mm. de espesor hasta formar un cilindro, en el cual quedo una costura que fue unida mediante el uso de cloroformo; sobre este unión, se pegó con este disolvente, una placa longitudinal dc 20 mm de espesor a lo largo del tubo para darle mayor solidez a la unión. Además se colocaron anillos de 40 mm. de ancho, en las parte inferior y superior, a 60 mm. de cada borde con el fin de tener elementos de sujeción para unirlo con las bases de aluminio.

Después que el tubo de mica (4 mm. de espesor) de destruyera, se debió buscar una alternativa que suplante al tubo original, que fuera de un material transparente y que soporte presiones de al menos 5 atm (de ser esto necesario).

Se consultó en industrias locales sobre si se tenía la infraestructura y los materiales para fabricarlo, pero los resultados no fueron alentadores:

Fabricarlo en fibra de vidrio significaba tener un tubo sin transparencia y con dificultades al momento de separarlo del molde sobre el cual se lo haría.

Una industria local que trabaja en vidrio no tenía la infraestructura ni la experiencia para fabricar tubos en vidrio termoformado, la máxima curvatura que le daban a un vidrio era la necesaria para conseguir la curvatura en los parabrisas de los automóviles.

Se investigó también la posibilidad de fabricarlo en acrílico de mayor espesor pero sin costuras, de una sola pieza. Una de las empresas que fabrica este material en el país expresó que no podían darle una curvatura al material ya que lo fabricaban en planchas.

Luego de esto se tomó contacto con el Ingeniero Trajano Ramírez, quien tiene extenso conocimiento en polímeros. El sugirió que se use resina de poliester (junto con otros componentes) para fabricar el tubo de descargas, este material garantizaba transparencia y la resistencia mecánica necesaria para soportar presiones positivas o negativas en su interior.

Además la ventajas sobre el acrílico era su mayor resistencia a la presión ya que la estructura del acrílico es de tipo lineal y la de la resina es espacial, la resina no se puede disolver una vez que ha polimerizado y es fácil de moldearla.

Se adquirió resina de poliester, catalizador y acelerante y se procedió a realizar varias pruebas variando las cantidades de estos elementos hasta encontrar la composición que permita obtener un elemento transparente y resistente.

Una vez logrado esto se experimentó con varios tipos de desmoldantes, fáciles de conseguir, ya que como la resina se colocaría en un molde tubular construido a base de dos tubos de PVC de diámetros diferentes y dispuestos concéntricamente entre si.

Los desmoldantes que se utilizaron fueron: vaselina liquida y sólida, silicona, masilla para automóvil, pintura esmalte, aceite para máquina, aceite para automotores, grasa, aluminio laminado, glicerina, etc.

Los mejores desmoldantes resultaron ser los aceites para máquina y para automotores y la grasa; aunque una vez secada la resina presentó porosidades en la superficie, el desmolde usando estos elementos resultó sin mayores complicaciones ya que la resina polimerizada no se adhería al molde de PVC.

El molde que se prepara estaba formado por dos tubos de PVC, uno de 6 pulgadas y el otro de 4 pulgadas, unidos entre sí por dos aros de madera (que para mayor precisión se los preparó en un torno para metales), y masillados con resina epóxica a cada superficie de los tubos para garantizar que no exista escape de la resina una vez que se la deposite en el molde.

En un primer intento, el tubo que se consiguió tenía una tonalidad rojiza debido al aumento de temperatura que experimentó durante la polimerización. Al tratar de cortarlo

con el uso dc una sierra mecánica el tubo se fracturó quedando un tubo de 25 cm. de longitud y con una coloración que no le daba transparencia al material.

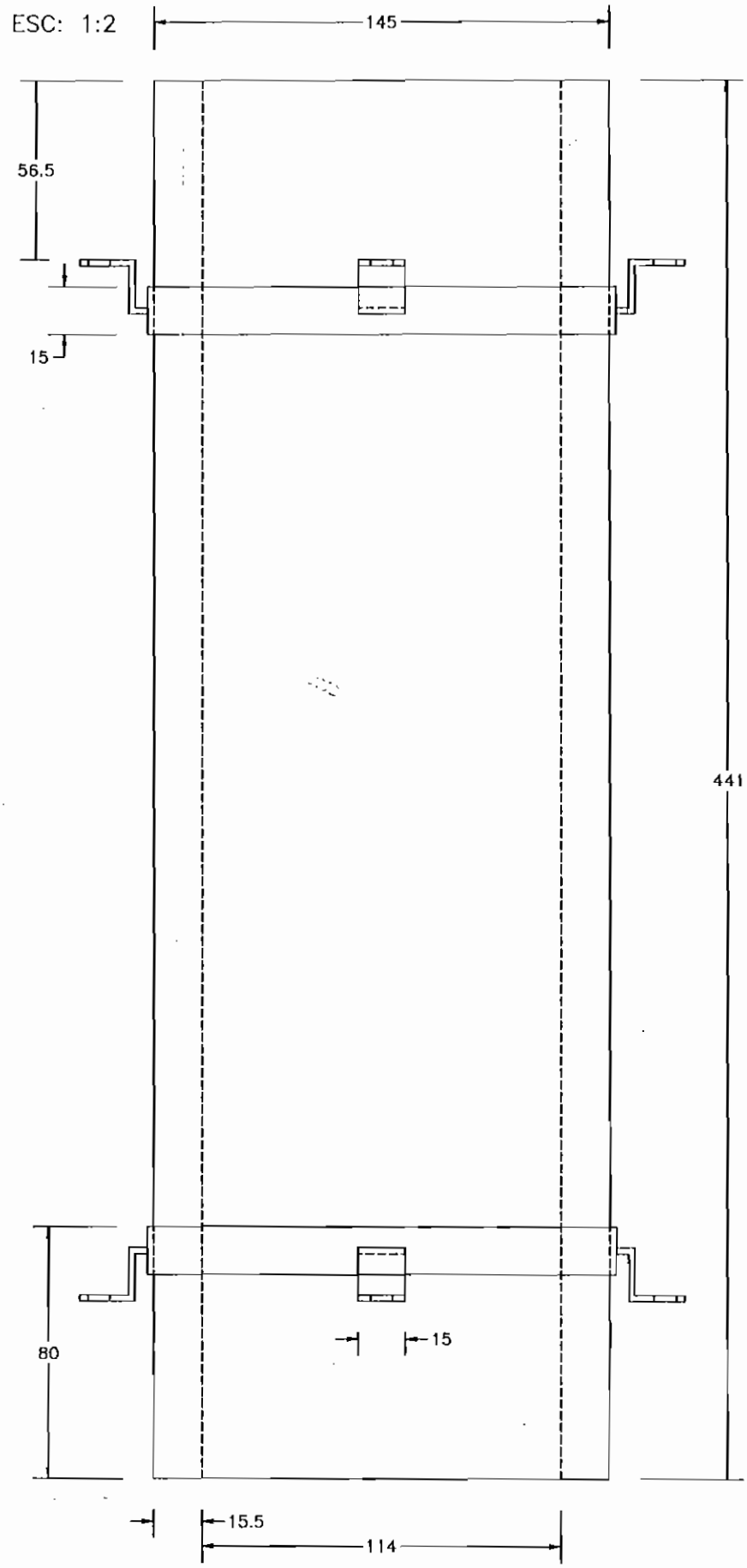
En un segundo intento, con un nuevo molde, se optó por controlar la temperatura colocando manualmente paños húmedos sobre el molde a fin de controlar su temperatura. Esta vez la resina no se polimerizó en forma homogénea en todo el volumen con lo cual ciertas regiones se endurecieron y otras no; esto causó diferentes esfuerzos en el material y diversas fracturas en el tubo de resina. Se polimerizó en 3:40 horas, y se logró rescatar un cilindro de 30 cm de longitud con una ligera coloración amarillenta.

Para el tercer ensayo se consiguió un tonel de metal al cual se lo lleno de agua, con el fin de controlar la temperatura y evitar una pigmentación en la resina. Al cabo de 6 días se retiró el molde del tonel con agua, y se lo dejó secar 2 días expuesto al sol.

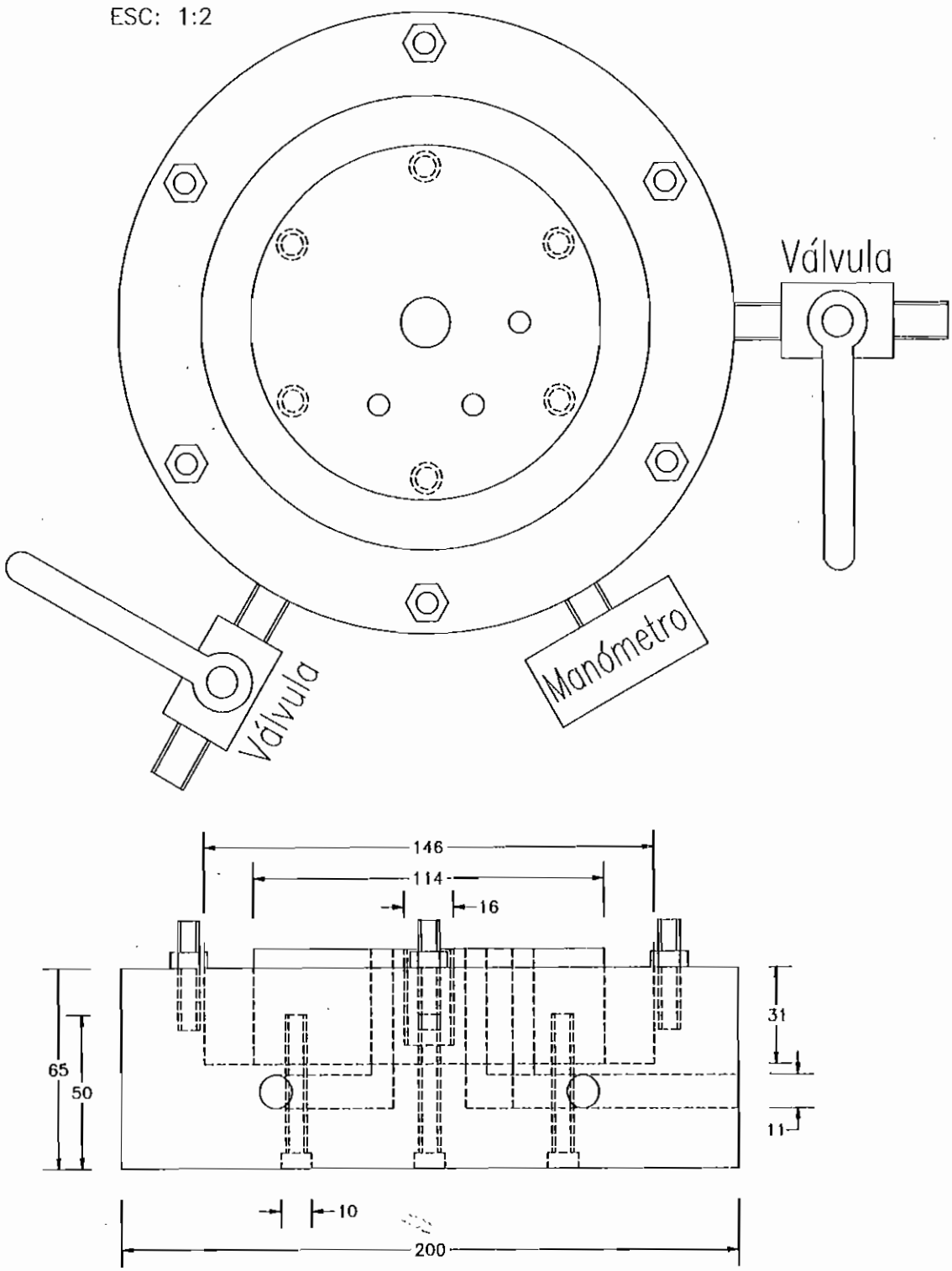
En este último intento se consiguió un cilindro transparente algo mas pequeño de lo esperado inicialmente pero sirvió muy bien en el momento de hacer el montaje con todo el equipo.

Se realizaron modificaciones en las dimensiones originales de la base y la tapa de aluminio ya que el tubo de resina tenía un diámetro y un espesor mayor al tubo de mica que se construyó originalmente.

En las siguientes páginas se grafican los elementos que conforman el equipo de descargas # 3. Todas las dimensiones estan en milímetros.

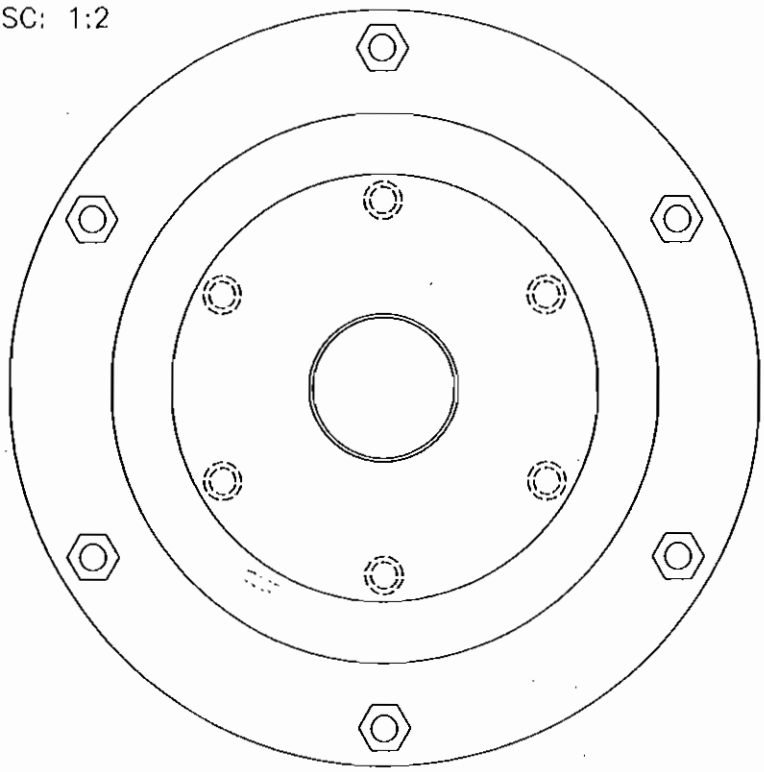


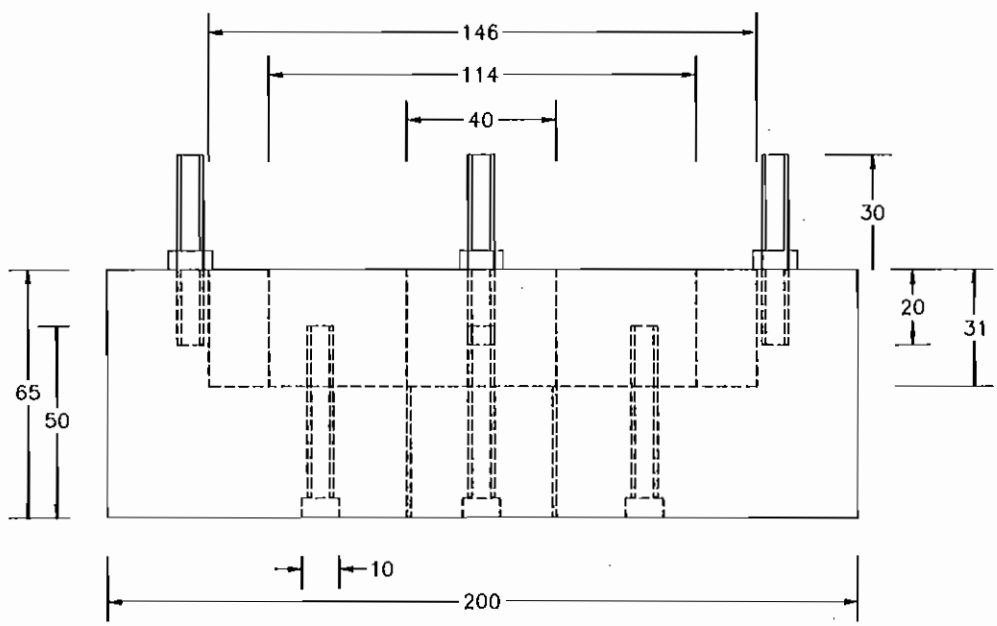

Tubo cilíndrico transparente de resina de poliester que conforma la cámara de descargas.



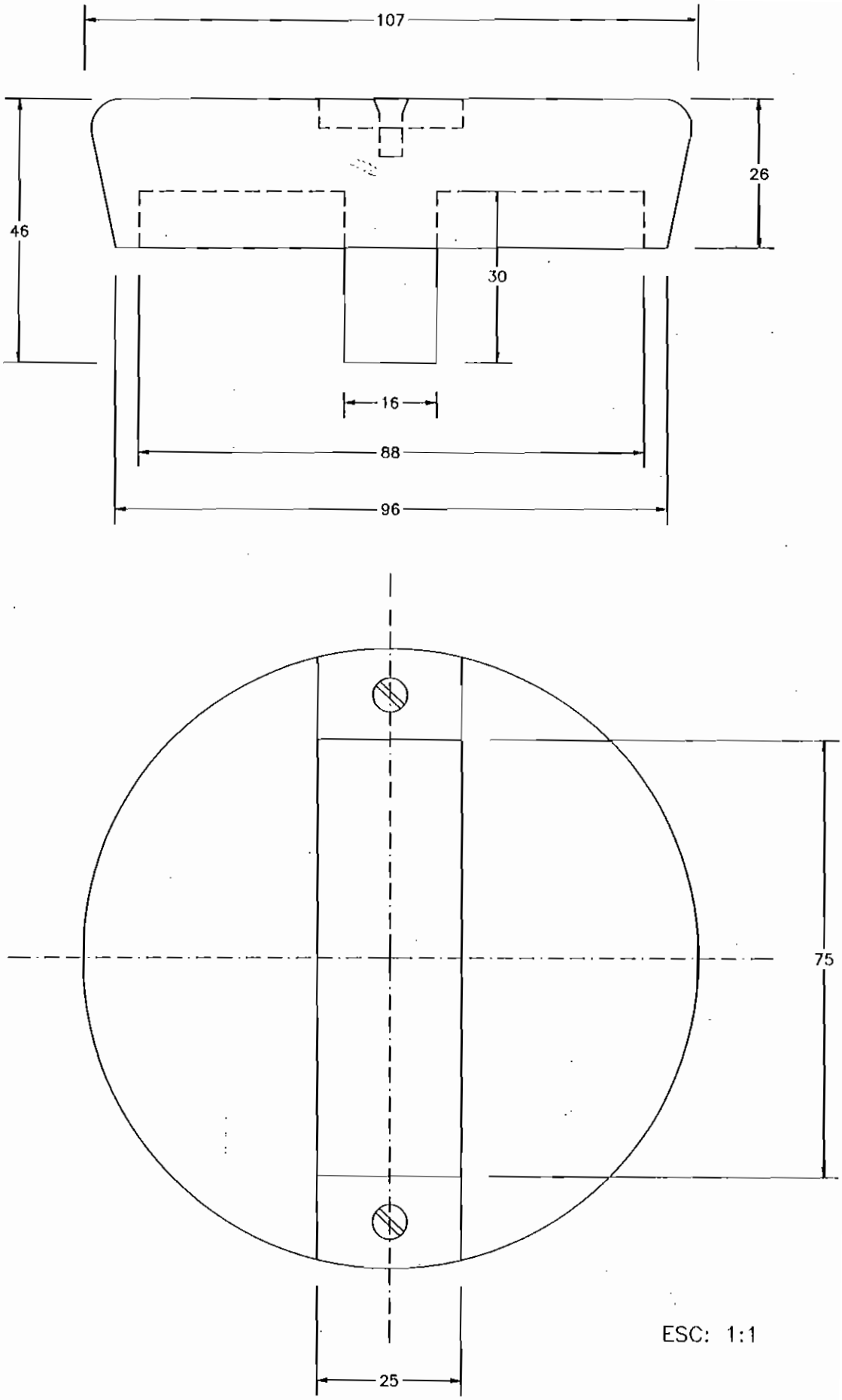

Base de aluminio que permite el control de la circulación del gas.

ESC: 1:2

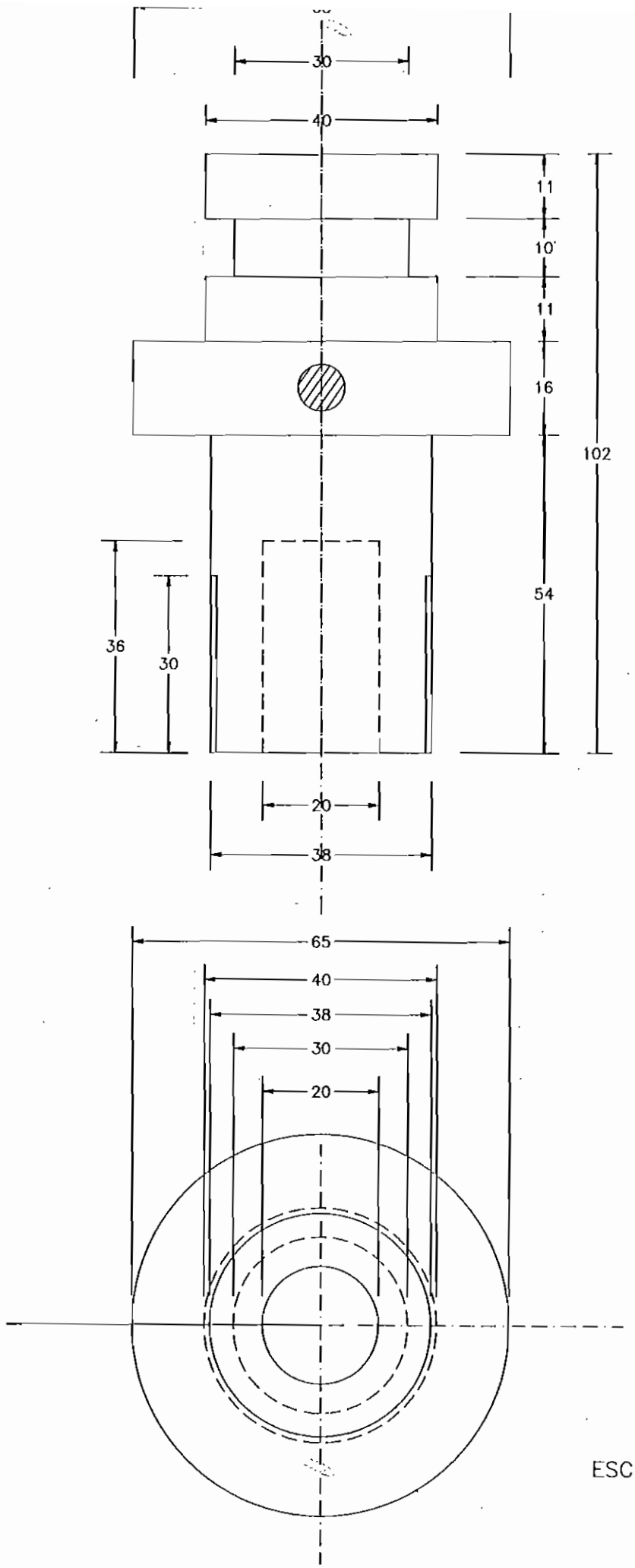





Base de aluminio que permite el cambio de los electrodos



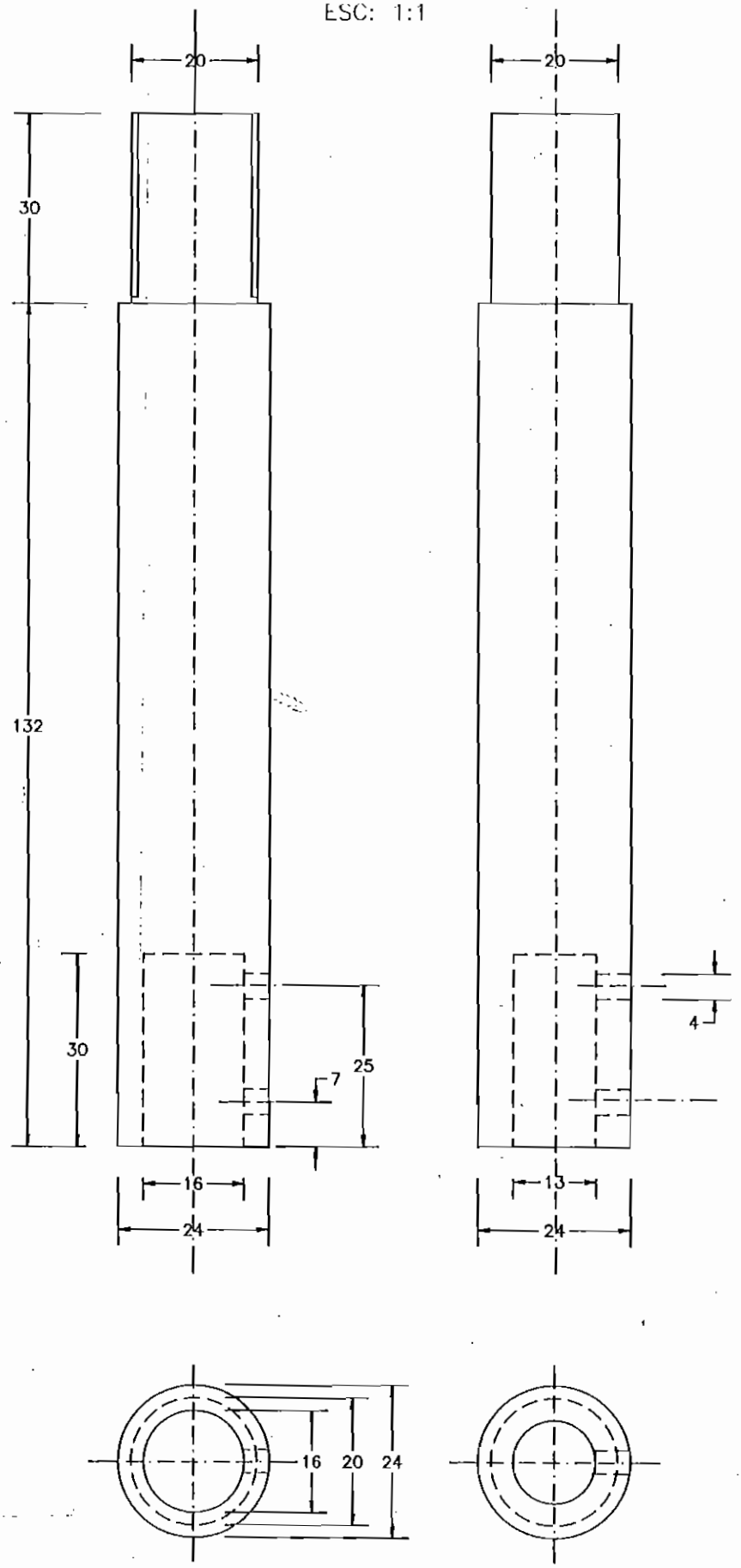

Porta probetas




Tornillo de la tapa superior del tubo de descargas que sujeta a la barra portelectrodos

ESC: 1:1

ESC: 1:1




Barra porta electrodos

Barra del porta probetas

## ANEXO 2

## DESCARGAS EN GASES EN CAMPOS UNIFORMES

## CURVA DE PASCHEN PARA EL NITROGENO

El grupo No. 15.03 (Aislamiento en gases) del Comité de estudio No. 15 (materiales aislantes) de CIGRÉ inició el estudio sobre el voltaje de descarga en los gases de mayor importancia técnica usados en la industria eléctrica.

Se decidió que el resultado de los estudios realizados debería proporcionar curvas en las cuales se expresaría el voltaje de descarga en función del producto presión por distancia.

Después que el grupo de investigadores acordara hallar la curva de los voltajes de descarga decidieron preparar la misma usando los resultados obtenidos por cada investigador con el fin de determinar las variaciones entre cada estudio realizado. El bar fue seleccionado como la unidad de presión y el mm como la unidad de espaciamiento.

El voltaje de descarga fue graficado como una función del producto bar* mm para 20 ó 25 °C.

Esto permitió graficar sobre una curva común de datos de las referencias usando diferentes valores de espaciamientos y presión. Se decidió usar una escala gráfica logarítmica para el eje del producto presión por distancia y en el eje del voltaje de

descarga. Se usaron criterios estadísticos para conseguir los puntos que forman parte de las curvas, por ello ciertos puntos son mas precisos que otros.

La Ley de Paschen establece que el voltaje de ruptura de un gas en un campo eléctrico uniforme es una función simple del producto **p * d** , donde **p** es la presión del gas y **d** es el espaciamiento de los electrodos. Se debe entender que esto se cumple al mantener durante la comprobación una temperatura constante, a una temperatura diferente, los valores deben ser corregidos, para grandes variaciones de la temperatura, las correcciones deberán ser hechas usando tablas de la densidad relativa de los gases o aplicando las ecuaciones de Van Der Waals.

Dentro del rango de aplicabilidad, la Ley de Paschen implica que cada voltaje de ruptura requiere un número crítico de multiplicaciones de electrones por colisiones ionizadoras de electrones con las moléculas del gas. El número crítico de colisiones es registrado cuando el campo eléctrico intersecta un número crítico de moléculas, independientemente de su proximidad (densidad).Entonces, la densidad decrementada requiere proporcionales aumentos del distanciamiento de los electrodos y viceversa.

Partiendo de la relación de la Ley de Paschen, la cual parece ser única para cada gas, son observadas notablemente para todas las altas presiones, o muy pequeños espaciamientos. Análisis de las desviaciones a altas presiones, tanto como a muy pequeños espaciamientos, indican que la desviación es asociada con grandes campos eléctricos, usualmente alrededor de 10 kV/mm. El inicio para estas desviaciones, que da el alejamiento del voltaje de ruptura por debajo de las curva de Paschen es variable,

dependiendo de la condición de la superficie de los electrones y partículas de materia fina en el gas.

Superficie rugosas, películas de óxido y partículas flotantes o semiconductoras las cuales alcanzan la superficie del electrodo, todas tienen el efecto de incrementar localmente el esfuerzo eléctrico en la superficie. La superficie rugosa y las partículas incrementan el esfuerzo al proveer puntos de gran esfuerzo (eléctrico) y las películas de óxido provocan barreras locales para la carga iónica que mantiene cerrada a la superficie del metal, creando de esta forma un campo local eléctrico expandido. El efecto de esta concentración de esfuerzos eléctricos puede producir, con grandes campos eléctricos aplicados, emisiones de electrones desde el metal., o micro descargas.

Estos electrones extras añadidos a aquellos formados por colisiones de ionización y otros procesos normales de ionización secundaria, pueden reducir el correspondiente voltaje requerido para la ruptura.

Correlativamente con estas superficies locales las concentraciones de esfuerzos eléctricos son estadísticamente variables con el voltaje de ruptura del gas, y reducen el voltaje de ruptura con el incremento del área de los electrodos, ambos ocurren predominantemente a altas presiones del gas y campos eléctricos.

Ya que el voltaje de descarga será mas reducido por la mayor superficie puntual o de las partículas, etc., el voltaje de ruptura puede ser gobernado en las regiones de alta presión (donde los valores parten bajo las curvas de Paschen) por el mínimo valor

estadístico. Estas estadísticas gobiernan a un área dependiente que fue inicialmente desarrollada para descargas en aceite.

Si el nivel de imperfecciones de las superficies y partículas es reducido suele ser obvio que alejamientos de la Ley de Paschen suelen ocurrir en grandes campos eléctricos.

Alejamientos de la curva de Paschen a presiones moderadas a muy pequeños espaciamientos, donde los campos de rnptura eléctricos son muy altos, incrementos por debajo de 10 kV/mm, y donde la rugosidad superficial llega a tener dimensiones significativas comparadas con el espaciamiento medio.

Mediciones de los voltajes de ruptura a pequeños valores **p*d** en la vecindad del valor mínimo de la Curva de Paschen han sido hechas muy a menudo usando bajas presiones y pequeños espaciamientos. En bajas presiones en la región del mínimo voltaje de rnptura, la rnptnra a menudo ocurre como una extensa descarga luminosa mas bien como un estrecho canal de chispas. El criterio de la rnptnra ha tenido un tratamiento arbitrario.

## CURVA DE PASCHEN PARA EL NITROGENO

El nitrógeno es el gas mas abundante en la atmósfera, comprende alrededor del 80% de la atmósfera de la tierra. Su resistencia dieléctrica ha sido medida por algunos de los primeros investigadores, quienes han reportado sus investigaciones en los volúmenes clásicos de Thompson & Thompson y Townsend.

El acuerdo de la mayoría de los datos en altos voltajes dentro del rango de aplicabilidad de la Ley de Paschen es aceptable. La mayoría de los desacuerdos entre los datos de diferentes investigadores esta en el rango del mínimo de la curva, donde la pureza del gas y el tipo de electrodos es muy importante. Los valores mínimos reportados en la década de los sesenta tienen rangos que van desde los 225 V a un máximo de 350 V con electrodos de diferentes materiales: cobre y acero respectivamente.

VOLTAJES DISRUPTIVOS DEL NITRÓGENO EN CAMPOS UNIFORMES A 25 °C.

| *PRESION* DISTANCIA (bar. mm)* | *VOLTAJE PICO DISRUPTIVO (kV)* | *PRESION* DISTANCIA (bar. mm)* | *VOLTAJE PICO DISRUPTIVO (kV)* | *PRESION* DISTANCIA (bar. mm)* | *VOLTAJE PICO DISRUPTIVO (kV)* |
|---|---|---|---|---|---|
| $3.10^{-3}$ | 0.76 | 0.1 | 0.86 | 20 | 55.0 |
| $4.10^{-3}$ | 0.48 | 0.5 | 2.9 | 30 | 78.0 |
| $5.10^{-3}$ | 0.375 | 1.0 | 4.8 | 40 | 100 |
| $6.10^{-3}$ | 0.31 | 1.5 | 6.6 | 50 | 121 |
| $8.10^{-3}$ | 0.26 | 2 | 8.2 | 60 | 143 |
| $1.10^{-2}$ | 0.26 | 3 | 11.3 | 80 | 182 |
| $2.10^{-2}$ | 0.30 | 4 | 14.4 | 100 | 224 |
| $3.10^{-2}$ | 0.36 | 5 | 17 | 120 | 266 |
| $4.10^{-2}$ | 0.44 | 6 | 20 | 140 | 306 |
| $5.10^{-2}$ | 0.52 | 8 | 25.1 | 160 | 346 |
| $6.10^{-2}$ | 0.58 | 10 | 30.0 | 180 | 384 |
| $8.10^{-2}$ | 0.73 | 15 | 43.0 | | |

FUENTE: ELECTRA, Conferencia Internacional sobre Grandes Sistemas Eléctricos en Alto Voltaje. CIGRÉ No.32 Enero 1974. París.

## ANEXO 3

## PROCESO EXPERIMENTAL DE LAS PROBETAS TRATADAS CON DESCARGA LUMINISCENTE.

PROBETA # 1:

Fecha: 19-03-1997 Hora de inicio: 15:24 Hora de finalización: 17:50
Voltaje: 4400 V presión: 2 mmHg. electrodo tipo: cono Distancia A-K: 7.5 cm.

*Notas:* Esta probeta se trató con el equipo marca Fluke. Se realizó otra vez el tratamiento iniciándolo a las 18:25 y finalizando a las 19:00. Al final del experimento se pudo observar un cambio de coloración en la región central de la probeta ya que la descarga se centró mediante un tubo de vidrio colocado sobre la probeta.

PROBETA # 2:

Fecha: 20-03-1997 Hora de inicio: 09:50 Hora de finalización: 10:50
Voltaje: 4400 V presión: 2 mmHg. electrodo tipo: cono Distancia A-K: 7.5 cm.

*Notas:* El tratamiento a esta probeta se la llevó a cabo en dos etapas, ya que en principio se usó el equipo Fluke y posteriormente el equipo de alto voltaje para pruebas. Luego de armar el circuito necesario para tener alto voltaje en D.C. a las 11:55 se continuó con la descarga la cual se inició aproximadamente en 4 kV ya que el voltímetro tiene un fondo de escala de 75 kV.

En el tablero de control se observó que el voltaje primario se ubicó en 75 V y la corriente en 5.5 A. Se finalizó a las 14:00.

Por lo tanto el tiempo total de tratamiento a esta probeta fue de 3 horas en dos etapas y con dos equipos diferentes.

PROBETA # 3:

Fecha: 20-03-1997 Hora de inicio: 16:05 Hora de finalización: 19:05
Voltaje p: 75 V Corriente p. = 5.7 A Presión: 1.5 mmHg. electrodo tipo: cono
Distancia A-K: 7.5 cm.

*Notas:* Se decidió tomar en cuenta mas bien el voltaje y la corriente a la entrada del transformador y con ello establecer la corriente que estaba circulando por el secundario. La corriente se calculó así: Isec = 220 * 5.7 / 100.000 = 12.5 ma.

Al inicio se debió elevar el voltaje sobre la probeta a un valor de 120 v en el primario con el fin que la luminiscencia cubriera toda la placa, esto se lo hizo por espacio de 1 minuto luego se bajó el voltaje a 75 Vp[1] y se mantuvo este voltaje durante todo el experimento.

A las 17:38 se disminuyó el voltaje ya que se descubrió que la corriente en el primario había aumentado a 6 amperios, por ello se trabajó con 65 Vp y 5.1 Ap valores con los cuales la luminiscencia se produce en toda la placa.

En el ánodo se observó un chisporroteo pero se vio que éste no produce ningún efecto sobre la luminiscencia en el cátodo.

La prueba sobre esta probeta se continuó a las 8:20 del 21-03-1997. Se inició la descarga con 90 Vp y 6Ap para que se cubra toda la probeta, al cabo de 40 minutos se la redujo a 70 Vp y 5.8 Ap.

Se terminó el proceso a las 9:50. Por lo tanto se completó un tiempo de 4:30 horas de tratamiento.

PROBETA # 4:

Fecha: 21-03-1997 Hora de inicio: 10:14 Hora de finalización: 16:15
Voltajep : 70 V presión: 2 mmHg. electrodo tipo: cono Distancia A-K: 7.5 cm.

*Notas:* El tratamiento se inicio con 110 Vp y 8.8 Ap para calentar el material y se lo mantuvo así por espacio de 23 minutos luego de lo cual se redujo a 70 Vp y 5.9 Ap.

PROBETA # 5:

Fecha: 21-03-1997 Hora de inicio: 16:55 Hora de finalización: 18:55
Voltajep : 70 V presión: 2 mmHg. electrodo tipo: cono Distancia A-K: 7.5 cm.

*Notas:* Se dej al descubierto una parte del portaprobetas para determinar si éste se cubría de la luminiscencia y se observó que también esta cubría aquella parte del portaprobetas que no había sido protegida.

Con esta probeta se realizó una variación: se usó aire en lugar de nitrógeno con el fin de determinar si el tratamiento que se había conseguido hasta entonces con las otras muestras se debía a una nitruración o una oxidación del material.

Por ello se limpió la muestra y se continuó a las 9:10 del día 24-03-1997 y se finalizó a las 11:35.

La descarga se inició con 110 Vp y luego se la mantuvo con 70 Vp y 6.2 Ap.

[1] Para simplificar el texto se usara: Vp= voltios en el primario, Ap= amperios en el primario, Vs= voltios en el secundario, As= amperios en el secundario.

PROBETA # 6:

Fecha: 27-03-1997 Hora de inicio: 9:44 Hora de finalización: 13:05
Voltajep : 35 V presión: 1.5 mmHg. electrodo tipo: aguja Distancia A-K: 1.3 cm.

*Notas:* Se debió disminuir la corriente de la descarga luminiscente con el uso de una resistencia limitadora con el fin de proteger el transformador de pruebas de alto voltaje. Se intercaló una resistencia de 50 kΩ 125 W. Inicialmente se trabajó con 49 V y 1 A en el lado de baja durante 10 minutos luego se continuó con el valor de 35V.

PROBETA # 7:

Fecha: 31-03-1997 Hora de inicio: 9:20 Hora de finalización: 19:20
Voltajep : 23 V presión: 1 mmHg. electrodo tipo: aguja Distancia A-K: 0.5 cm.

*Notas:* En el inicio se mantuvo por 10 minutos un voltaje de 50 Vp y luego se redujo a 23Vp. Se inyecto nitrógeno cada 2 horas a la cámara de descargas.

PROBETA # 8:

Fecha: 1-04-1997 Hora de inicio: 7:20 Hora de finalización: 19:00
Voltajep : 25 V presión: 1.3 mmHg. electrodo tipo: aguja Distancia A-K: 0.5 cm.

*Notas:* Por 10 minutos se mantuvo un voltaje de 45V debido a que este voltaje se presentó como el límite entre la luminiscencia ténue que cubría toda la placa y el inicio de la luminiscencia intensa; un posterior incremento en el voltaje hacia pasar a la luminiscencia intensa.

Debido a un corte de energía se debió realizar el tratamiento en dos etapas completando un tiempo de 8 horas.

PROBETA # 9:

Fecha: 1-04-1997 Hora de inicio: 7:14 Hora de finalización: 9:04 (2-04-1997)
Voltajep : 25 V presión: 1.3 mmHg. electrodo tipo: aguja Distancia A-K: 0.5 cm.

*Notas:* El tratamiento se llevó a cabo durante 14 horas. Durante los 10 primeros minutos se trabajó con 50 V en el lado de baja.

PROBETA # 10:

Fecha: 2-04-1997 Hora de inicio: 12:10 Hora de finalización: 18:17
Voltajep : 33 V presión: 1.3 mmHg. electrodo tipo: aguja Distancia A-K: 0.5 cm.

*Notas:* Se elevó el voltaje a 50 Voltios por 10 minutos, luego se lo mantuvo a 33 Voltios. Con el fin de aumentar la densidad de corriente se cubrió la probeta y se redujo su área a casi la mitad.

PROBETA # 11:

Fecha: 17-04-1997 Hora de inicio: 8:30 Hora de finalización: 14:30
Voltajep : 67 V presión: 1 mmHg. electrodo tipo: aguja Distancia A-K: 15 cm.
Voltajesecundario : 2100 V

*Notas:* A partir de esta probeta se comenzó a usar otro circuito para la energización de la cámara de descargas, el mismo consta de 2 transformadores alimentados independientemente por dos variadores de voltaje.

Se alimentó la cámara de descargas con nitrógeno cada 5 minutos.

PROBETA # 12:

Fecha: 17-03-1997 Hora de inicio: 13:20 Hora de finalización: 17:50
Voltajep : 68 V presión: 0.5 mmHg. electrodo tipo: aguja Distancia A-K: 15 cm.

*Notas:* Esta probeta se trató en las mismas condiciones que la anterior pero se alimentó con nitrógeno solamente al inicio con el fin de determinar las diferencias que se presenten entre las dos.

PROBETA # 13:

Fecha: 18-04-1997 Hora de inicio: 9:05 Hora de finalización: 14:00
Voltajep : 70 V presión: 0.5 mmHg. electrodo tipo: aguja Distancia A-K: 16.1 cm.

*Notas:* Esta probeta fue tratada sin el uso del portaprobetas con el fin de determinar las variaciones en el tratamiento en comparación con aquellas en las que se usó el portaprobetas.

## ANEXO 4

# TABLAS DE CONVERSION DE DUREZAS.



TABLE 1 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-Austenitic Steels (Rockwell C to Other Hardness Numbers)

| Rockwell C Hardness Number | Vickers Hardness Number | Brinell Hardness Number[A] | | Rockwell Hardness Number | | Rockwell Superficial Hardness Number | | | Scleroscope Hardness[B] | Rockwell C Hardness Number |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 10-mm Standard Ball, 3000-kgf Load | 10-mm Carbide Ball, 3000-kgf Load | A Scale, 60-kgf Load, Diamond Penetrator | D Scale, 100-kgf Load, Diamond Penetrator | 15-N Scale, 15-kgf Load, Superficial Diamond Penetrator | 30-N Scale, 30-kgf Load, Superficial Diamond Penetrator | 45-N Scale, 45-kgf Load, Superficial Diamond Penetrator | | |
| 68 | 940 | ... | ... | 85.6 | 76.9 | 93.2 | 84.4 | 75.4 | 97.3 | 68 |
| 67 | 900 | ... | ... | 85.0 | 76.1 | 92.9 | 83.6 | 74.2 | 95.0 | 67 |
| 66 | 865 | ... | ... | 84.5 | 75.4 | 92.5 | 82.8 | 73.3 | 92.7 | 66 |
| 65 | 832 | ... | 739 | 83.9 | 74.5 | 92.2 | 81.9 | 72.0 | 90.6 | 65 |
| 64 | 800 | ... | 722 | 83.4 | 73.8 | 91.8 | 81.1 | 71.0 | 88.5 | 64 |
| 63 | 772 | ... | 705 | 82.8 | 73.0 | 91.4 | 80.1 | 69.9 | 86.5 | 63 |
| 62 | 746 | ... | 688 | 82.3 | 72.2 | 91.1 | 79.3 | 68.8 | 84.5 | 62 |
| 61 | 720 | ... | 670 | 81.8 | 71.5 | 90.7 | 78.4 | 67.7 | 82.6 | 61 |
| 60 | 697 | ... | 654 | 81.2 | 70.7 | 90.2 | 77.5 | 66.6 | 80.8 | 60 |
| 59 | 674 | ... | 634 | 80.7 | 69.9 | 89.8 | 76.6 | 65.5 | 79.0 | 59 |
| 58 | 653 | ... | 615 | 80.1 | 69.2 | 89.3 | 75.7 | 64.3 | 77.3 | 58 |
| 57 | 633 | ... | 595 | 79.6 | 68.5 | 88.9 | 74.8 | 63.2 | 75.6 | 57 |
| 56 | 613 | ... | 577 | 79.0 | 67.7 | 88.3 | 73.9 | 62.0 | 74.0 | 56 |
| 55 | 595 | ... | 560 | 78.5 | 66.9 | 87.9 | 73.0 | 60.9 | 72.4 | 55 |
| 54 | 577 | ... | 543 | 78.0 | 66.1 | 87.4 | 72.0 | 59.8 | 70.9 | 54 |
| 53 | 560 | ... | 525 | 77.4 | 65.4 | 86.9 | 71.2 | 58.6 | 69.4 | 53 |
| 52 | 544 | 500 | 512 | 76.8 | 64.6 | 86.4 | 70.2 | 57.4 | 67.9 | 52 |
| 51 | 528 | 487 | 496 | 76.3 | 63.8 | 85.9 | 69.4 | 56.1 | 66.5 | 51 |
| 50 | 513 | 475 | 481 | 75.9 | 63.1 | 85.5 | 68.5 | 55.0 | 65.1 | 50 |
| 49 | 498 | 464 | 469 | 75.2 | 62.1 | 85.0 | 67.6 | 53.8 | 63.7 | 49 |
| 48 | 484 | 451 | 455 | 74.7 | 61.4 | 84.5 | 66.7 | 52.5 | 62.4 | 48 |
| 47 | 471 | 442 | 443 | 74.1 | 60.8 | 83.9 | 65.8 | 51.4 | 61.1 | 47 |
| 46 | 458 | 432 | 432 | 73.6 | 60.0 | 83.5 | 64.8 | 50.3 | 59.8 | 46 |
| 45 | 446 | 421 | 421 | 73.1 | 59.2 | 83.0 | 64.0 | 49.0 | 58.5 | 45 |
| 44 | 434 | 409 | 409 | 72.5 | 58.5 | 82.5 | 63.1 | 47.8 | 57.3 | 44 |
| 43 | 423 | 400 | 400 | 72.0 | 57.7 | 82.0 | 62.2 | 46.7 | 56.1 | 43 |
| 42 | 412 | 390 | 390 | 71.5 | 56.9 | 81.5 | 61.3 | 45.5 | 54.9 | 42 |
| 41 | 402 | 381 | 381 | 70.9 | 56.2 | 80.9 | 60.4 | 44.3 | 53.7 | 41 |
| 40 | 392 | 371 | 371 | 70.4 | 55.4 | 80.4 | 59.5 | 43.1 | 52.6 | 40 |
| 39 | 382 | 362 | 362 | 69.9 | 54.6 | 79.9 | 58.6 | 41.9 | 51.5 | 39 |
| 38 | 372 | 353 | 353 | 69.4 | 53.8 | 79.4 | 57.7 | 40.8 | 50.4 | 38 |
| 37 | 363 | 344 | 344 | 68.9 | 53.1 | 78.8 | 56.8 | 39.6 | 49.3 | 37 |
| 36 | 354 | 336 | 336 | 68.4 | 52.3 | 78.3 | 55.9 | 38.4 | 48.2 | 36 |
| 35 | 345 | 327 | 327 | 67.9 | 51.5 | 77.7 | 55.0 | 37.2 | 47.1 | 35 |
| 34 | 336 | 319 | 319 | 67.4 | 50.8 | 77.2 | 54.2 | 36.1 | 46.1 | 34 |
| 33 | 327 | 311 | 311 | 66.8 | 50.0 | 76.6 | 53.3 | 34.9 | 45.1 | 33 |
| 32 | 318 | 301 | 301 | 66.3 | 49.2 | 76.1 | 52.1 | 33.7 | 44.1 | 32 |
| 31 | 310 | 294 | 294 | 65.8 | 48.4 | 75.6 | 51.3 | 32.5 | 43.1 | 31 |
| 30 | 302 | 286 | 286 | 65.3 | 47.7 | 75.0 | 50.4 | 31.3 | 42.2 | 30 |
| 29 | 294 | 279 | 279 | 64.6 | 47.0 | 74.5 | 49.5 | 30.1 | 41.3 | 29 |
| 28 | 286 | 271 | 271 | 64.3 | 46.1 | 73.9 | 48.6 | 28.9 | 40.4 | 28 |
| 27 | 279 | 264 | 264 | 63.8 | 45.2 | 73.3 | 47.7 | 27.8 | 39.5 | 27 |
| 26 | 272 | 258 | 258 | 63.3 | 44.6 | 72.8 | 46.8 | 26.7 | 38.7 | 26 |
| 25 | 266 | 253 | 253 | 62.8 | 43.8 | 72.2 | 45.9 | 25.5 | 37.8 | 25 |
| 24 | 260 | 247 | 247 | 62.4 | 43.1 | 71.6 | 45.0 | 24.3 | 37.0 | 24 |
| 23 | 254 | 243 | 243 | 62.0 | 42.1 | 71.0 | 44.0 | 23.1 | 36.3 | 23 |
| 22 | 248 | 237 | 237 | 61.5 | 41.6 | 70.5 | 43.2 | 22.0 | 35.5 | 22 |
| 21 | 243 | 231 | 231 | 61.0 | 40.9 | 69.9 | 42.3 | 20.7 | 34.8 | 21 |
| 20 | 238 | 226 | 226 | 60.5 | 40.1 | 69.4 | 41.5 | 19.6 | 34.2 | 20 |

[A] The Brinell hardness numbers in boldface type are outside the range recommended for Brinell hardness testing in 3.2.2 of Test Method E 10.

[B] These Scleroscope hardness conversions are based on Vickers—Scleroscope hardness relationships developed from Vickers hardness data provided by the National Bureau of Standards for 13 steel reference blocks. Scleroscope hardness values obtained on these blocks by the Shore Instrument and Mfg. Co., Inc., the Roll Manufacturers Institute, and members of this institute and also on hardness conversions previously published by the American Society for Metals and the Roll Manufacturers Institute.

Fuente: ASTM; Annual Handbook of ASTM Standards Nonferrous Metals Products; Volumen 02.01; USA; 1984.

## BIBLIOGRAFIA

### CAPITULO 1

[1] ALONSO, Marcelo; FINN, Edward; Física; Vol. III: Fundamentos cuánticos y estadísticos; Edit Addison- Wesley Iberoamérica, Barcelona, 1987.

[2] BLEULER, E. ; HAXBY, R.O.; Electronic Methods; Academic Press; New York; 1964.

[3] CARRILLO CALDERON, Santiago; Análisis y cálculo digital de pérdidas por efecto corona en sistemas de transmisión; Tesis de Grado; E.P.N. - F.I.E.; Quito, Febrero de 1977.

[4] COBINE, James; Gaseous Conductors, Dover Publications; Inc.;New York; 1958.

[5] FAURE, R.; Iniciación a la electrónica; Marcombo S.A.; Ediciones técnicas; Barcelona; 1962.

[6] FIELD, F.H.; FRANKLIN, J.L.; Electron impact phenomena; Academic Press; New York; 1970.

[7] FINK Donald; BEATY Wayne; Manual de Ingeniería Eléctrica; Decimotercera edición; Edit. McGraw-Hill; México; 1966.

[8] HLAWICZKA, Paul; Introducción a la electrónica cuántica; Edit. Reverté S.A.; London, 1977.

[9] KUFFEL, E.; ABDULLAH, M.; High - Voltaje Engineering; Pergamon Press; Oxford - London; 1970.

[10] MILLMAN, Jacob; SEELY, Samuel; Electrónica; Edit. Labor, Barcelona, 1966.

[11] REICH; Herbert; Theory and applications of electron tubes; Mc Graw - Hill; New York; 1939.

[12] RYDER, D.; Electronic Fundamentals and applications; Third edition; Prentice Hall, Inc; USA; 1964.

[13] SPANGENBERG, Karl; Fundamentals of electron devices; Mc-Graw-Hill; New York; 1957.

[14] WEED, Herman; DAVIS, Wells; Fundamentals of electron devices and circuits; Prentice Hall Inc; N.J.; USA; 1965.

**CAPITULO 2**

[15] ACEROS DE LLODIO S.A.; Tratamientos térmicos de herramientas de aceros; Edit. Urmo; Bilbao, España; 1973.

[16] APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; Edit. Dossat; Madrid; 1968.

[17] AVNER Sydney; Introducción a la Metalurgia Física; Segunda edición; McGraw-Hill; Mexico; 1992.

[18] BOKSHTEIN, B.,S.; Difusión en metales; Editorial Mir; Moscú; 1980.

[19] JASTRZEBSKI, ZBIGNIEW; Naturaleza y propiedades de los materiales para ingeniería; Edit. Mir; Moscu; 1979.

[20] KOLACHEV, B.A.; GABIDULLIN,R.M.; PIGUZOV, Yu; Tecnología de tratamiento térmico de los metales y aleaciones no férreas; Edit Mir; Moscú; trad. al español en 1983.

[21] KOZLOV, Yu; Ciencia de los materiales; Edit Mir; Moscú; trad. al español en 1986.

[22] LAJTIN,Yu ; ARZAMASOV,B; Tratamiento químico térmico de los metales; Edit Mir; Moscú; trad. al español en 1987.

[23] LASHERAS, José; SANCHEZ-MARIN, José; Tecnología de los materiales industriales; Ediciones CEDEL; Barcelona; España; 1969.

[24] PASCUAL, José; Técnica y práctica del tratamiento térmico de los metales férreos; Edit. Blume; Barcelona España; 1968.

[25] ROMERO, Jorge; GAINZA, Edwin; Estudio de la nitruración gaseosa; Tesis de grado; Quito, E.P.N.; 1994.

[26] STÜDEMAN Hans; Tratamiento térmico de los aceros; Manual del ingeniero; Vol XII; Bilbao; España; 1980.

**CAPITULO 3**

[27] AMERICAN SOCIETY FOR METALS; Metals Handbook; Volumen 4: Heat treating; ninth edition; 1981; USA.

[28] ASTM; Annual Handbook of ASTM Standards Nonferrous Metals Products; Volumen 02.01; USA; 1984.

[29] HUACA PINCHAO, José María; Análisis de métodos para cuantificación del efecto corona; Tesis; Abril de 1983; Quito-Ecuador.

[30] ELECTRA, Conferencia Internacional sobre Grandes Sistemas Eléctricos en Alto Voltaje. CIGRÉ No.32 Enero 1974. París.

[31] SERVICE DIAMOND TOOL COMPANY, Service diamond Hardness conversion chart, Michigan, USA.

**INDICE**


INTRODUCCION i

OBJETIVO ii

ALCANCE iii

**CAPITULO 1 : INTRODUCCION**

1.1 GENERALIDADES 1

1.2 ESTRUCTURA ATOMICA 2

1.2.1 NATURALEZA FOTONICA O CUANTICA DE LA LUZ 2

1.2.2 BANDAS DE ENERGIA 3

1.2.3 FUNCION DE TRABAJO 6

1.2.4 IONIZACION 9

1.2.4.1 COLISIONES DE LOS ELECTRONES CON LOS ATOMOS 10

1.2.4.2 COLISIONES DE LOS FOTONES CON LOS ATOMOS 11

1.2.4.3 COLISIONES DE LOS IONES POSITIVOS CON LOS ATOMOS 13

1.2.4.4 IONIZACION MULTIPLE 14

1.2.5 DESIONIZACION Y RECOMBINACION 15

1.3 DESCARGA LUMINISCENTE EN NITROGENO MOLECULAR 17

1.3.1 CONDUCCION ELECTRICA EN UN GAS 17

1.3.2 DESCARGA NO AUTOSOSTENIDA 19

1.3.3 DESCARGA AUTOSOSTENIDA 21

1.3.4 LEY DE PASCHEN 24

1.3.4.1 INFLUENCIA DE LA FORMA DE LOS ELECTRODOS 29

1.3.5 DESCARGA LUMINISCENTE 30

1.3.5.1 CARACTERISTICAS DE LA DESCARGA LUMINISCENTE 36

1.3.5.2 DISTRIBUCION DE POTENCIAL EN LA DESCARGA LUMINISCENTE 40

1.3.5.3 DISGREGACION EN EL CATODO 43

1.3.6 DESCARGA LUMINISCENTE A ALTAS PRESIONES 43

1.3.7 ARCO ELECTRICO 44

1.3.8 COMPARACION ENTRE DESCARGA LUMINISCENTE Y ARCO 47

1.4 LA NITRURACION 48

**CAPITULO 2 : LA NITRURACION GASEOSA**

INTRODUCCION 52

2.1 DIFUSION EN LOS METALES 54

2.1.1 MECANISMO DE LA DIFUSION 57

2.1.2 DIFUSION EN LOS CUERPOS SOLIDOS 58

2.2 FORMACION Y ESTRUCTURA DE LA CAPA NITRURADA 63

2.2.1 DIAGRAMAS DE FASE 63

2.2.1.1 DIAGRAMA HIERRO-CARBONO 67

2.2.1.2 DIAGRAMA HIERRO-NITROGENO 70

2.2.2 MECANISMO DE FORMACION DE LA CAPA NITRURADA 72

2.3 TIPOS DE METALES USADOS EN LA NITRURACION 76

2.4 NITRURACION CON GAS 8I

2.4.1 TRATAMIENTO PRELIMINAR 83

2.4.1.1 PREPARACION DE LAS PIEZAS
ANTES DE LA NITRURACION 83
2.4.2 PROCESO DE NITRURACION IONICA 87
2.5 CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DE LAS
PIEZAS NITRURADAS 94
2.5.1 CARACTERISTICAS MECANICAS 94
2.5.2 DEFORMACIONES Y DEFECTOS DE LAS
PIEZAS NITRURADAS 95
2.5.2.1 DEFORMACIONES 95
2.5.2.2 DEFECTOS 98
2.5.3 CONTROL DE CALIDAD DE LAS PIEZAS NITRURADAS 100
2.5.4 ESPESOR DE LA CAPA NITRURADA. 101
2.6 VENTAJAS Y APLICACIONES 103
CONCLUSIONES 108

**CAPITULO 3 : ENSAYOS DE NITRURACION CON DESCARGA LUMINISCENTE**

3.1 TUBO DE DESCARGAS 110
3.1.1 DISEÑO Y CONSTRUCCION 110
3.2 SELECCION DE CONDICIONES DE OPERACION 116
3.2.1 LEY DE PASCHEN EN NITROGENO MOLECULAR 122
3.2.2 SELECCION Y CONTROL DE VOLTAJES Y CORRIENTES 128
3.2.3 VISUALIZACION DE LA DESCARGA LUMINISCENTE 141
3.3 PROCESO EXPERIMENTAL 146
3.3.1 GEOMETRIA DE LAS PIEZAS TRATADAS 150

3.3.2 TIEMPO DE EXPOSICION 151

3.4 PRUEBAS EN PIEZAS ESTUDIADAS 152

3.4.1 ENSAYO METALOGRAFICO 152

3.4.2 ENSAYO DE IMPACTO Y DUREZA 155

APENDICE 164

**CAPITULO 4 : RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

4.1 ANALISIS DE RESULTADOS 175

4.2 CONCLUSIONES 189

4.3 RECOMENDACIONES 196

**ANEXOS**

ANEXO 1 199

ANEXO 2 209

ANEXO 3 214

ANEXO4 218

**BIBLIOGRAFIA**

BIBLIOGRAFIA DEL CAPITULO 1 220

BIBLIOGRAFIA DEL CAPITULO 2 221

BIBLIOGRAFIA DEL CAPITULO 3 222