

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

RECONSTRUCCION DE LOS RODETES PELTON DE LA HIDROELECTRICA  
AGUACAPA, AVERIADOS POR CAVITACION

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERIA

FOR

HUGO ROBERTO CALZIA SALAZAR

AL CONFERIRLE EL TITULO DE

INGENIERO MECANICO

GUATEMALA, JULIO DE 1,996

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central



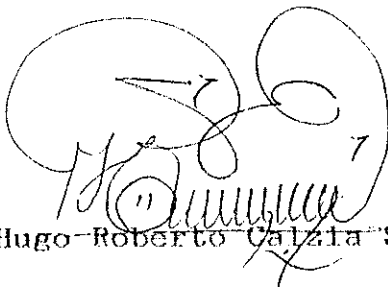
08  
T(3746)  
C-4

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

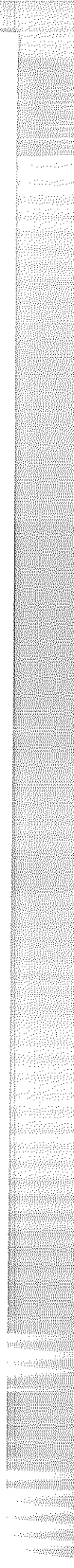
Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

RECONSTRUCCION DE LOS RODETES PELTON  
DE LA HIDROELECTRICA AGUACAPA,  
AVERIADOS POR CAVITACION

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 31 de agosto de 1,993.



Hugo Roberto Calzía Salazar



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



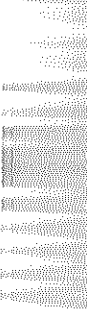
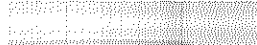
FACULTAD DE INGENIERIA

MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

|               |                                      |
|---------------|--------------------------------------|
| DECANO        | ING. JULIO ISMAEL GONZALEZ PODSZUECK |
| VOCAL PRIMERO | ING. MIGUEL ANGEL SANCHEZ GUERRA     |
| VOCAL SEGUNDO | ING. JACK DOUGLAS IBARRA SOLORZANO   |
| VOCAL TERCERO | ING. JUAN ADOLFO ECHEVERRIA MENDEZ   |
| VOCAL CUARTO  | BR. FERNANDO WALDEMAR DE LEON C.     |
| VOCAL QUINTO  | BR. PEDRO IGNACIO ESCALANTE PASTOR   |
| SECRETARIO    | ING. FRANCISCO JAVIER GONZALEZ LOPEZ |

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN  
GENERAL PRIVADO

|            |                                     |
|------------|-------------------------------------|
| DECANO     | ING. JORGE MARIO MORALES G.         |
| EXAMINADOR | ING. PEDRO M. MORALES               |
| EXAMINADOR | ING. ERICK GONZALEZ                 |
| EXAMINADOR | ING. VICTOR MANUEL DURAN            |
| SECRETARIO | ING. EDGAR JOSE AURELIO BRAVATTI C. |



Guatemala, 29 de abril de 1,996

Ingeniero  
Arturo Estrada,  
COORDINADOR DEL AREA DE MATERIALES Y COMPLEMENTARIA,  
Facultad de Ingeniería,  
Universidad de San Carlos de Guatemala,  
Escuela de Ingeniería Mecánica.

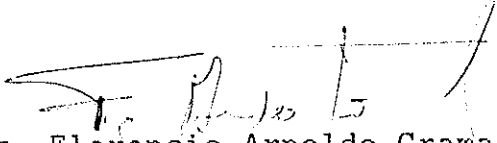
Señor Coordinador.

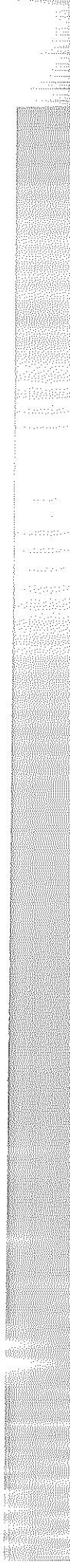
Atentamente le informo que he asesorado el trabajo de tesis titulado "RECONSTRUCCION DE LOS RODETES PELTON DE LA HIDROELECTRICA AGUACAPA AVERIADOS POR CAVITACION", del estudiante HUGO ROBERTO CALZIA SALAZAR; previo a optar el título de Ingeniero Mecánico.

Al respecto, le manifiesto que, luego de efectuadas las revisiones y correcciones del caso, encuentro satisfactorio el trabajo, tomando en consideración que el mismo cumple con los objetivos propuestos y que, además, en lo sucesivo será de mucha utilidad para los trabajos de reconstrucción de rodets de la Hidroeléctrica Aguacapa; por lo que lo apruebo y se lo remito para el trámite correspondiente.

El autor de esta tesis y su asesor son responsables por el contenido y conclusiones de la misma.

Atentamente,

  
Ing. Florencio Arnaldo Gramajo Ovalle  
Colegiado No. 2229  
Asesor







FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

El Coordinador del área Materiales y Complementaria de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del asesor, y habiendo revisado en su totalidad el trabajo titulado Reconstrucción de los Rodetes Pelton de Hidroeléctrica Aguacapa, Averiadados por Cavitación, del estudiante Hugo Roberto Calzia Salazar, recomienda su autorización.

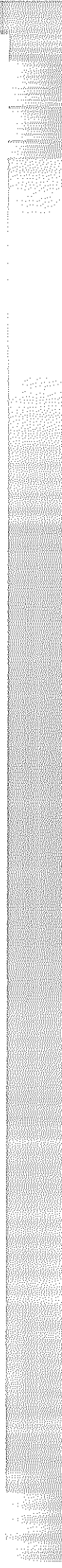
ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. José Arturo Estrada Martínez

Coordinador de Área

Guatemala, mayo de 1,996.

/bedei.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con el visto bueno del Coordinador del Area Complementaria, al trabajo de tesis titulado **Reconstrucción de los Rodetes Pelton de la Hidroeléctrica Aguacapa Averiaados por Cavitación**, del estudiante **Hugo Roberto Calzia Salazar**, procede a la autorización del mismo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Jorge C. Siguere Rockstroh

DIRECTOR DE ESCUELA

Guatemala, junio de 1,996.

/bedei





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Ingeniero Jorge C. Siguere Rockstroh, al trabajo de tesis titulado **Reconstrucción de los Rodetes Pelton de la Hidroeléctrica Aguacapa, Averiadados por Cavitación**, presentado por el estudiante universitario Hugo Roberto Calzia Salazar, procede a la autorización para la impresión del mismo.

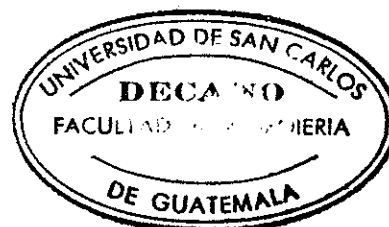
IMPRIMASE

ING. JULIO ISMAEL GONZALEZ PODSZUECK

DECANO

Guatemala, junio de 1,996.

/behdei.





ACTO QUE DEDICO

A DIOS

Por brindarme sabiduría, y guiarme  
por el buen camino para alcanzar la  
meta propuesta.

A MIS PADRES

Ernesto Calzia García  
Emilia Salazar Pineda

A MI ESPOSA

Brenda Manola Galindo A. de Calzia

A MIS HIJOS

Edwin Orlando,  
Brenda Marina y  
Hugo Ernesto

A MIS HERMANOS

Artemio, Myra Lorena, Hortencia,  
Elvia Marina, Quilita y Elmer;

ESPECIALMENTE A:

Ing. Oscar Guillermo Calzia R. y  
Agrónomo Rodolfo Calzia R.

A MI FAMILIA EN GENERAL,  
ESPECIALMENTE A:

Marina J. Alvarez de Galindo

A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS

Con especial afecto





## AGRADECIMIENTO

A: Ing. Florencio Arnoldo Gramajo Ovalle, por haberme asesorado y apoyado, con su experiencia profesional y técnica para alcanzar los objetivos deseados en ésta tesis.

Pablo Guillermo Barrios Oliva, quien contribuyó con su experiencia técnica, para el desarrollo de éste trabajo.

Edgar Abraham Salazar Barrios, por su colaboración.



## INDICE GENERAL

| CONTENIDO  | PAGINA No. |
|--|------------|
| LISTADO DE SIMBOLOS TECNICOS   | i          |
| GLOSARIO DE TERMINOS TECNICOS  | ii         |
| INTRODUCCION   | iii        |
| CAPITULO I   |            |
| LA CAVITACION Y LOS EFECTOS EN LAS TURBINAS PELTON                                 | 1          |
| TIPOS DE FALLAS QUE SE PRODUCEN  | 1          |
| 1.1 DESCRIPCION DE LA CAVITACION   | 4          |
| 1.2 DANOS QUE PRODUCE EN LAS TURBINAS PELTON                                       | 6          |
| 1.3 PARAMETROS RELACIONADOS CON DEFECTOS Y DANOS                                   | 7          |
| 1.4 INFLUENCIA EN EL RENDIMIENTO DE LA TURBINA                                     | 11         |
| 1.5 COMO MINIMIZAR EL EFECTO DE LA CAVITACION                                      | 15         |
| CAPITULO II  |            |
| EVALUACION DEL DAÑO EN LOS RODETES   | 17         |
| 2.1 PROCEDIMIENTO DE INSPECCION VISUAL   | 17         |
| 2.2 PROCEDIMIENTO DE VERIFICACION DIMENSIONAL                                      | 17         |
| 2.3 PROCEDIMIENTO PARA LA INSPECCION POR LIQUIDOS<br>PENETRANTES EN LOS CANGILONES | 21         |
| 2.4 PROCEDIMIENTO PARA LA INSPECCION POR PARTICULAS<br>MAGNETICAS                  | 37         |
| CAPITULO III   |            |
| REPARACION DE LOS CANGILONES DEPENDIENDO DE LAS FALLAS<br>QUE PRESENTE             | 39         |
| 3.1 ANALISIS DE FALLAS   | 39         |
| 3.2 TIPOS DE REPARACIONES  | 40         |
| CAPITULO IV  |            |
| TRABAJOS REALIZADOS PARA LA RECUPERACION DE LOS<br>CANGILONES                      | 68         |
| 4.1 METALURGIA DE LA SOLDADURA   | 68         |
| 4.2 PROCEDIMIENTO DE PRECALENTAMIENTO  | 73         |
| 4.3 PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA   | 75         |
| 4.4 TEMPERATURAS ENTRE PASOS   | 77         |

|  |   |     |
|--|---|-----|
| 4.5  | PROCESO DE ENFRIAMIENTO DE LA SOLDADURA | 77  |
| 4.6  | MATERIAL DE APORTE PARA LA SOLDADURA    | 77  |
| 4.7  | MANEJO DEL MATERIAL DE APORTE           | 79  |
| 4.8  | CARACTERISTICAS ELECTRICAS              | 79  |
| CAPITULO V   |   |     |
| PROCESO DE AMOLADO Y PULIDO PARA DAR FORMA FINAL AL CANGILON |   | 80  |
| 5.1  | ABRASIVOS UTILIZADOS                    | 80  |
| 5.2  | CLASIFICACION DEL GRANO                 | 82  |
| 5.3  | CONSTRUCCION DE LA HERRAMIENTA ABRASIVA | 82  |
| 5.4  | MARCADO DE LAS PIEDRAS ABRASIVAS        | 83  |
| 5.5  | MACHOTES ABRASIVOS                      | 83  |
| 5.6  | PROCEDIMIENTO PARA EL AMOLADO Y PULIDO  | 84  |
| CAPITULO VI  |   |     |
| INSPECCION FINAL   |   | 86  |
| 6.1  | INSPECCION VISUAL                       | 86  |
| 6.2  | INSPECCION DIMENSIONAL                  | 86  |
| 6.3  | TRATAMIENTO TERMICO                     | 86  |
| 6.4  | ENSAYOS POR LIQUIDO PENETRANTE          | 90  |
| CAPITULO VII   |   |     |
| COSTOS   |   | 91  |
| 7.1  | ANALISIS DE COSTOS                      | 91  |
| 7.2  | EQUIPO UTILIZADO                        | 94  |
| 7.3  | PERSONAL UTILIZADO                      | 94  |
| 7.4  | RESULTADOS E ILUSTRACIONES              | 95  |
| CONCLUSIONES   |   | 109 |
| RECOMENDACIONES  |   | 110 |
| BIBLIOGRAFIA   |   | 111 |
| ANEXOS   |   | 113 |

## LISTADO DE SIMBOLOS TECNICOS

|     |  |
|-----|--|
| A   | Amperios                                       |
| AWS | American Welding Society                       |
| C   | Carbono  |
| CO2 | Bióxido de carbono                             |
| Cr  | Cromo  |
| DIN | Norma alemana                                  |
| Fe  | Hierro   |
| FeO | Oxido de hierro                                |
| K   | Potasio  |
| KVA | Kilovoltio-amperio                             |
| KWH | Kilovatio hora                                 |
| Mn  | Manganeso                                      |
| Mo  | Molibdeno                                      |
| N   | Newton   |
| Na  | Sodio  |
| Ni  | Niquel   |
| ns  | Velocidad específica                           |
| O   | Oxígeno  |
| PSI | (Pound Square Inch) Libra por pulgada cuadrada |
| Si  | Silicio  |
| Ti  | Titanio  |
| UTP | Casa fabricante de electrodos                  |
| V   | Vanadio  |
| °C  | Grados centígrados                             |
| °F  | Grads Farenheit                                |

## GLOSARIO DE TERMINOS TECNICOS

|                   |  |
|-------------------|--|
| <b>ABRASION</b>   | Proceso de frotar, esmerilar o gastar por fricción.  |
| <b>ABRASIVO</b>   | Sustancia utilizada para esmerilar, bruñir, pulir. Incluye materiales naturales como granete, esmeril y diamante, y, productos de horno eléctrico como óxido de aluminio, carburo de silicio y carburo de borio. |
| <b>ACERO</b>      | Producto constituido por hierro y carbono, resulta ser un carburo de hierro. Su contenido de carbono varía entre 0.2% y 1.76%. Es llamado también acero al carbono.  |
| <b>ALEACION</b>   | Sustancia con propiedades metálicas, compuesta por dos o más elementos químicos, de los cuales por lo menos uno es un metal elemental.   |
| <b>AMOLADO</b>    | Se refiere, a la acción de cortar material, para darle la forma al cangilón en reparación, por medio de una máquina herramienta llamada amoladora y materiales abrasivos   |
| <b>AUSSTENITA</b> | Denominación de la estructura cristalino-cúbica centrada en las caras (CCC) del hierro.  |
| <b>CAUDAL</b>     | Cantidad de agua que corre por unidad de tiempo.   |
| <b>CAVITACION</b> | Formación y colapso instantáneo de innumerables y pequeñísimos huecos o cavidades dentro de un líquido, sometido a rápidos e intensos cambios de presión.  |
| <b>CORROSION</b>  | Deterioro de un metal mediante reacción química o electroquímica con su ambiente.  |

|                              |  |
|------------------------------|--|
| <b>DECALAJE</b>              | Corrimiento relativo de una pieza respecto a otra.   |
| <b>DUREZA</b>                | Resistencia del material a la penetración de su superficie; se correlaciona con la resistencia al desgaste.  |
| <b>EMULSIFICANTE</b>         | En la inspección por penetrante, material agregado a algunos penetrantes, después de que el penetrante se aplica, para hacer una mezcla lavable con agua.  |
| <b>EROSION</b>               | Destrucción de metales o de otros materiales por la acción abrasiva de fluidos en movimiento, generalmente acelerado por la presencia de partículas en suspensión.   |
| <b>EROSION-CORROSION</b>     | Cuando éstas actúan, simultáneamente.  |
| <b>ESTRUCTURA CRISTALINA</b> | Ordenamiento de los átomos de un material en una red repetitiva.   |
| <b>FATIGA</b>                | Fenómeno que origina la fractura bajo esfuerzos repetidos o fluctuantes, con un valor máximo menor que la resistencia tensil del material. Las fracturas por fatiga son progresivas, empezando como fisuras diminutas que crecen bajo la acción del esfuerzo fluctuante. |
| <b>FUNDICION</b>             | Proceso en el cual el metal fundido es forzado dentro de la cavidad de un molde de metal bajo la aplicación de alta presión.   |
| <b>LUZ NEGRA</b>             | Radiación electromagnética no visible para el ojo humano. La porción del espectro generalmente utilizada en inspección fluorescente cae en la región ultravioleta, entre 3,300 y 4,000 Amstron., con el pico en 3,650.   |

|                            |  |
|----------------------------|--|
| <b>MARTENSITA</b>          | Fase metaestable formada en el acero y otros materiales a través de una transformación atérmica.   |
| <b>PERFIL DEL CANGILON</b> | Es la punta del cangilón que divide geométricamente el chorro de agua expulsado por la tobera de la turbina.   |
| <b>PERLITA</b>             | Microconstituyente laminar bifásico, que contiene ferrita y cementita.   |
| <b>PRECALENTAMIENTO</b>    | Calentamiento previo a un tratamiento térmico o mecánico.  |
| <b>PRESION</b>             | Acción de un cuerpo pesado sobre otro. Fuerza que ejercen los fluidos en todas direcciones. Se designa como $P = F/S$  |
| <b>POROSIDAD</b>           | Finos orificios o poros dentro de un metal.  |
| <b>REVENIDO</b>            | Tratamiento térmico utilizado para reducir la dureza de la martensita.   |
| <b>TEMPLADO</b>            | Tratamiento térmico de calentamiento y enfriamiento brusco controlado, que causa el endurecimiento del acero.  |
| <b>TERMOPAR</b>            | Dispositivo para medir temperaturas, consta de dos metales diferentes que producen una fuerza electromotriz, aproximadamente, proporcional a la diferencia de temperatura entre sus extremos de unión caliente y fría. |
| <b>TOBERA</b>              | Dispositivo por el cual sale el chorro de agua hacia la turbina. El chorro es regulable por medio de un servomotor interno que abre y cierra la aguja.   |
| <b>TRATAMIENTO TERMICO</b> | Calentar y enfriar un metal o aleación sólida en tal forma que se obtengan las condiciones y propiedades deseadas. En esta definición no   |



se incluye el calentar con el sólo propósito de trabajar en caliente.

#### VISCOSIDAD

Propiedad de los líquidos y gases de fluir con cierta dificultad por ciertos conductos u orificios, debido al rozamiento entre capas contiguas del fluido.

#### ZONA CRITICA

Intervalo de temperatura en la cual se llevan a cabo las transformaciones en los aceros.



## INTRODUCCION

La idea de elaborar este trabajo de tesis surge porque no existe documentación alguna sobre el proceso de reconstrucción de rodetes tipo Pelton, aunque existe alguna experiencia del personal técnico de la Central Hidroeléctrica Aguacapa, la cual no está documentada.

Durante las primeras reconstrucciones de los rodetes se contrató personal técnico de la casa fabricante, con la idea de que instruyera al personal técnico de la Central en la aplicación de los procedimientos que permitan obtener resultados satisfactorios. Se pueden mencionar, entre otros, algunos de los propósitos perseguidos: cómo inspeccionar los daños y determinar la gravedad de los mismos, la aplicación del recargo de soldadura tomando en cuenta que se deben precalentar las áreas a soldar y, por consiguiente, cuando las reparaciones sean mayores hacer el alivio de tensiones respectivo. Toda esta información verbal ha ido perdiéndose como resultado de la rotación del personal, por distintas razones, hecho que provocó el desperdicio de alguna información, la cual fue investigada y se puso en práctica para el desarrollo de esta tesis.

Según se pudo comprobar, a nivel del INDE, en la mayoría de plantas hidráulicas no se cuenta con la información básica para la reconstrucción de los rodetes y, por consiguiente, los resultados no son los adecuados, llegando, en algunos casos, al extremo de perder el rodete de la turbina por el desprendimiento de alguno de los cangilones.

Por lo anteriormente expuesto, se desarrolló este trabajo, el cual permitirá lograr que la Hidroeléctrica Aguacapa y otras Centrales Hidroeléctricas del INDE, con turbinas hidráulicas al 13/4 Cr/Ni, apliquen las técnicas más adecuadas de reconstrucción en el menor tiempo posible, para evitar pérdidas mayores debido a la indisponibilidad de la Unidad Generadora y, así, prolongar la vida útil de la misma. Además, se persigue que el ingeniero que labora actualmente en las centrales hidráulicas esté bien informado sobre las variantes de carácter técnico y metalúrgico relativas a la fabricación de nuevas turbinas Pelton, ya que, como consecuencia

de lo anterior, pueden cambiar las condiciones mencionadas en este trabajo.

La investigación permitió comprobar que, durante los últimos 40 años, las turbinas hidráulicas se han fabricado con aleaciones de 13/4 Cr/Ni, debido a su comportamiento hidráulico, con lo que se garantiza, para estos casos, la utilización de los procedimientos que se detallan en esta tesis.

Para proporcionar una mejor comprensión de los efectos, determinación, realización y aplicación, este estudio se ha dividido en tres fases: la primera se refiere a los efectos causados por la cavitación y evaluación de los daños en el rodete (Capítulos I y II). La segunda fase trata sobre los procedimientos de reconstrucción de los rodetes (Capítulos III, IV, V y VI). La última fase está relacionada con los costos y los resultados e incluye ilustraciones de los distintos equipos y materiales utilizados para la ejecución de este trabajo.

## C A P I T U L O I

**LA CAVITACION Y LOS EFECTOS EN LAS  
TURBINAS PELTON****TIPOS DE FALLAS QUE SE PRODUCEN**

En los rodetes Pelton se presentan cuatro tipos de defectos principales:

1. la erosión creada por las partículas abrasivas, tales como arenas, residuos minerales o similares;
  2. los golpes o cráteres ocasionados por el impacto de partículas sólidas, como piedras y otros materiales;
  3. la cavitación y la cavitación con erosión localizada, ocasionada por condiciones hidráulicas locales;
  4. las fisuras, que aparecen en el material debido a fallas internas y sobrecargas localizadas;
- a) los primeros dos defectos se producen, básicamente, por el agua y el contenido de sólidos que ésta contenga. La resistencia a la erosión depende, también, del tipo de material del rodete, pues, los materiales de mayor dureza presentan mayor resistencia.

Generalmente, cuando se inicia el deterioro a causa de la erosión, se complica con la aparición de condiciones hidráulicas locales; por lo que el crecimiento del daño se acelera. Por esta razón, cuando se detectan daños de este tipo, es aconsejable repararlos antes de que lleguen a un estado muy avanzado;

- b) el fenómeno de la cavitación se explicará, ampliamente, más adelante;
- c) las fisuras son, entre los defectos o daños, los más

peligrosos de todos. Son originadas por defectos existentes en el material y pueden estar en la superficie o bajo ésta.

Debido al esfuerzo de los efectos alternativos a que está sometido el rodete, estos defectos se agrandan hasta un tamaño crítico y, físicamente, producen la falla o la aparición de la fisura.

Desde el punto de vista de mantenimiento, es importante clasificar las fisuras de acuerdo con su importancia.

Sin considerar el tamaño de las mismas, se van a considerar tres zonas de fisuras, cuya importancia está relacionada con las zonas críticas de esfuerzos, las cuales se analizan a continuación:

1. las fisuras que no crecen, incluso localizadas en la arista: este tipo de fisuras, en términos generales, no ponen en peligro de forma crucial el funcionamiento ni la seguridad de la Unidad, pues, no siguen un crecimiento acelerado y se mantienen dentro de ciertos límites;

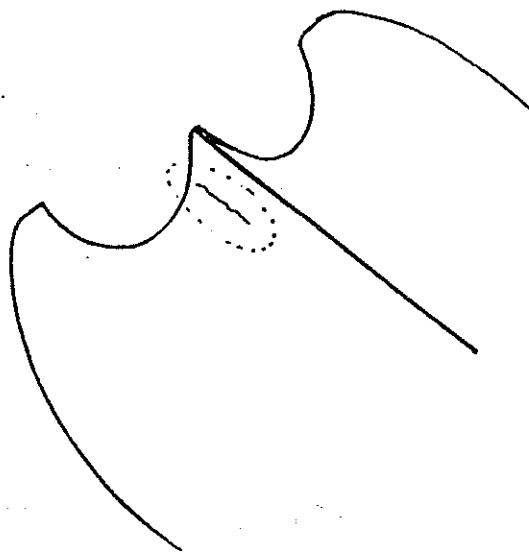


Fig. 1: Fisura con poco crecimiento.

2. las fisuras en la parte de unión del cangilón con el disco: éstas son las más peligrosas y deben ser detectadas y eliminadas antes de que lleguen a profundidades críticas; que puedan conducir a una ruptura total del cangilón y a su desprendimiento;

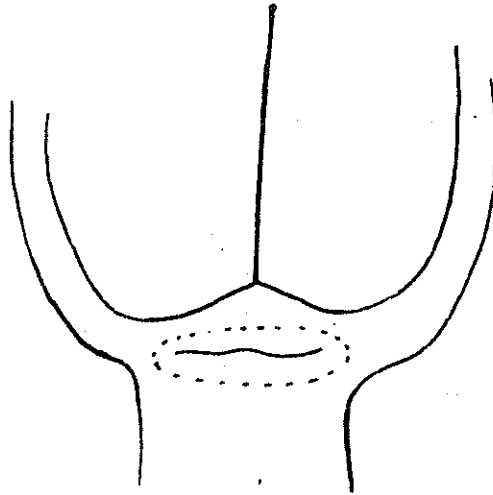


Fig. 2: Ubicación crítica de una fisura, ya que ésta se encuentra en la raíz del cangilón.

3. fisuras esparcidas: éstas se presentan en zonas menos críticas, a causa de concentración anormal de tensiones y defectos localizados. Aunque en estas zonas la concentración de tensiones es baja, suele suceder que, por una concentración de defectos en el material, se reducen los valores de resistencia, lo cual representa una concentración de tensiones. También puede deberse a tratamientos térmicos inadecuados o completados, deficientemente.

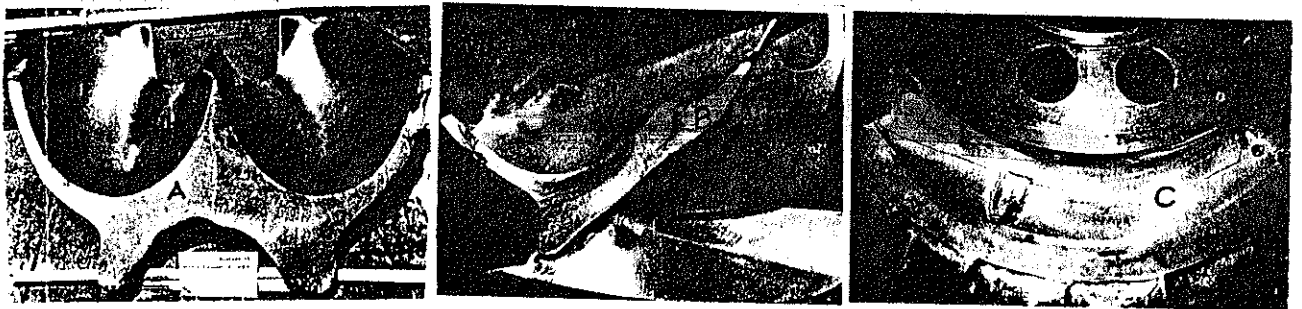


Fig. 3-A: Cara fracturada de un cangilón dañado. La fisura se inició en la zona de soldadura.

Fig. 3-B: Falla de un cangilón, debido a un tratamiento térmico impropio.

Fig. 3-C: Fisura por fatiga en el disco de la rueda, se originó en los contrapesos de balanceo fijados con soldadura.

### 1.1 DESCRIPCION DE LA CAVITACION

El nombre de cavitación significa la formación de cavidades en el seno del líquido, causadas por burbujas de vapor dentro de la masa líquida, las cuales se producen por una vaporización local a causa de ciertas condiciones dinámicas, como puede ser una alta velocidad relativa y, consecuentemente, una reducción de la presión local hasta el valor de la tensión de vapor a la temperatura actual del líquido.

Si la presión absoluta en un flujo líquido fuera igual a la presión del vapor o, menor que ésta, aparecen burbujas de vapor que son separadas del flujo (A, en la figura 4).

Según ensayos realizados, las burbujas de vapor aparecen, principalmente, en las paredes del canal, pues, en un flujo libre de turbulencia, las menores presiones ocurren siempre en las paredes. Si la presión estática aumenta, las burbujas desaparecen, luego que la presión de vapor sea superada (B, en la figura 4) o, sea, que una burbuja de vapor se destruye cuando es arrastrada a una zona de más alta presión. Esto, cuando ocurre es muy rápido, y las partículas fluidas llegan a las paredes del canal con velocidades muy elevadas (C, en la figura 4), lo que causa esfuerzos mecánicos muy intensos en los materiales de la pared, en puntos tales como C en la figura 4, lo que, frecuentemente, trae como consecuencia la destrucción del material.





Fig. 4: Muestra la aparición y posterior explosión de la burbuja.

La cavitación es, esencialmente, un proceso inestable, ya que la onda de presión debida al colapso de la burbuja eleva, momentáneamente, el nivel de presión local, con lo que la presión cesa. El ciclo se repite y la frecuencia puede ser muy alta (hasta por encima de 25,000 ciclos por segundo). Se entiende que bajo tales circunstancias de fluctuación el líquido es sacudido y empujado hacia los poros del metal, produciendo compresiones locales que sobrepasan la resistencia del material, ocasionando desprendimiento del mismo.

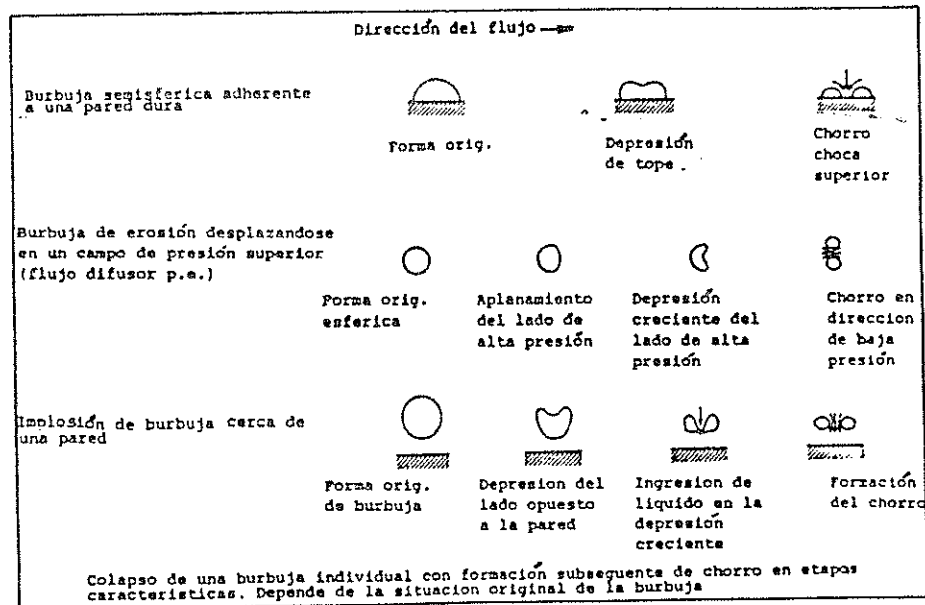


Fig. 5: Cuadro esquemático de la explosión de la burbuja.

## 1.2 DAÑOS QUE PRODUCE EN LAS TURBINAS PELTON

El fenómeno de la cavitación en las turbinas Pelton se manifiesta en las siguientes partes:

- a) en el dorso del cangilón, en la línea central: se debe, fundamentalmente, a que el triángulo de velocidades a la entrada del cangilón no es el adecuado. Esto puede deberse a un perfil erróneo o, también, a la operación de la máquina bajo una caída o velocidad inadecuada;
- b) en las partes traseras de la arista de los cangilones: este caso se ha observado, especialmente, cuando la turbina opera con varias toberas y, además, mucha caída. Entonces, se produce una lluvia de gotas que crean una atmósfera alrededor de la rueda e impactan contra la superficie mencionada, creando la cavitación;
- c) en la superficie interior de los cangilones: este caso es ocasionado por el perfil inadecuado del cangilón o de la transmisión de la arista por distorsiones del chorro, las cuales pueden estar originadas en las toberas o en las agujas;

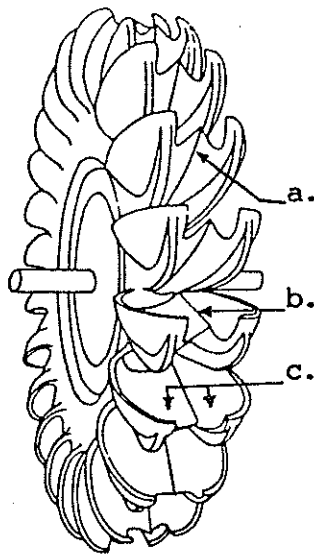


Fig. 6: Rodete Pelton.

- d) la cavitación con erosión localizada: puede ser iniciada y acelerada por el desgaste y los daños a causa de impactos de cuerpos sólidos.

### 1.3 PARAMETROS RELACIONADOS CON DEFECTOS Y DAÑOS

1.3.1 Los parámetros que determinan la aparición de daños del tipo de la cavitación y la cavitación con erosión localizada son, básicamente:

- a) las condiciones de operación, carga y altura neta;
- b) los daños ocasionados por golpes de materiales sólidos;
- c) la variación del perfil adecuado, ocasionado por el desgaste o por perfiles originales inadecuados;
- d) las distorsiones en el chorro, ocasionadas por el desgaste de las agujas, asientos de las agujas (embocaduras), u otras condiciones reinantes en la válvula esférica o en la tubería forzada;
- e) el material del rodete.

1.3.2 Los daños del tipo fisura están determinados por los parámetros siguientes:

- a) las propiedades del material del rodete y su dimensionamiento.

Aquí juega un papel esencial el dimensionamiento del rodete, en función de los valores característicos de los materiales utilizados. Los cangilones deben recibir el impacto del chorro y transmitir la fuerza aplicada

al disco de la rueda y éste, a través del acoplamiento, al eje turbina-generador;

- b) los defectos que presente el material, ya sean defectos superficiales o sub-superficiales, los cuales ocasionarán concentraciones locales de tensiones que harán que, localmente, sean superados los valores de resistencia del material. Estos defectos también pueden ser originados por un inadecuado alivio de tensiones.

1.3.3 Los ciclos de carga: asumimos como ciclos o impactos en un cangilón el número de veces que un cangilón es atacado por un chorro.

Esto es comparable a cargar y descargar, sucesivamente, el material y es lo que influye en forma directa en el fenómeno de fatiga. El rodete, en conjunto, es sometido a ciclos de carga cada vez que sufre una variación considerable de carga; ya sea en el arranque, en la parada o en los rechazos de carga.

Un fenómeno de mucha influencia en los ciclos de carga es la alternancia en la dirección del impacto, que es opuesta cuando se aplica el freno hidráulico. Este ataca los cangilones por el lado opuesto al chorro de acción y produce, de esta manera, una alternancia muy severa para el material.

Dentro de los ciclos de carga se distinguen:

- a) los impactos en los cangilones,
- b) arranques y paradas,
- c) frenadas hidráulicas,
- d) rechazos de carga.

En la vida útil de un rodete, generalmente, se presentan varios procesos de daño del mismo; sin embargo, el proceso dominante, el que más rápidamente progresa hasta llegar a la falla, va a ser el que determine la vida del rodete.

1.3.4 Fatiga: el proceso más grande que se conoce en las ruedas Pelton es un fenómeno combinado de fatiga y erosión. Es un fenómeno mecánico-químico complejo que se manifiesta, especialmente, en la combinación entre acero inoxidable y el agua.

Su efecto más importante es que la resistencia a la fatiga del material disminuye en forma gradual con el número de ciclos de carga.

Se han establecido, según Wohler, unas curvas que relacionan el número de ciclos de carga y la resistencia a la fatiga del material. Para un mismo material resulta, además, que el valor de la resistencia a la fatiga varía con la agresividad del medio.

Diversos factores juegan un papel influyente en la aceleración o desaceleración de este fenómeno; entre ellos sobresale el valor medio de la tensión a que está sometido el cangilón.

A nivel de orientación, para el caso de la Hidroeléctrica Aguacapa y de acuerdo con las curvas de Wohler según valores de experiencias similares, se puede tomar como referencia una cantidad de ciclos de carga  $2.6 \times 10^{10}$ , para los cuales se estima que hay una probabilidad de casi el 100% de que las características del material se mantengan dentro de los límites de seguridad. Si se toman en cuenta los coeficientes de seguridad empleados, será prudente ir intensificando los controles, especialmente los superficiales, en

función del incremento de los ciclos de carga y de los defectos y reparaciones que se van presentando. De este modo se pueden observar las siguientes curvas (Figs. 7 y 8) las cuales relacionan la influencia entre el límite de fatiga y la tensión promedio, para un material similar al de los rodets de la Hidroeléctrica Aguacapa.

Asimismo, en las curvas siguientes (Fig. 7) se observa la relación entre la profundidad crítica y el rango de tensiones al que se halla sometido.

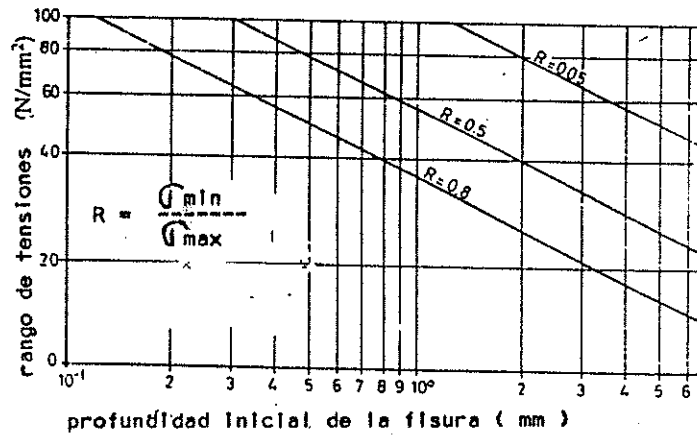


Fig. 7. Relación aproximada entre la profundidad crítica de una fisura y el rango de tensiones aplicado en el caso de un acero fundido del tipo Cr/Ni 13/4.

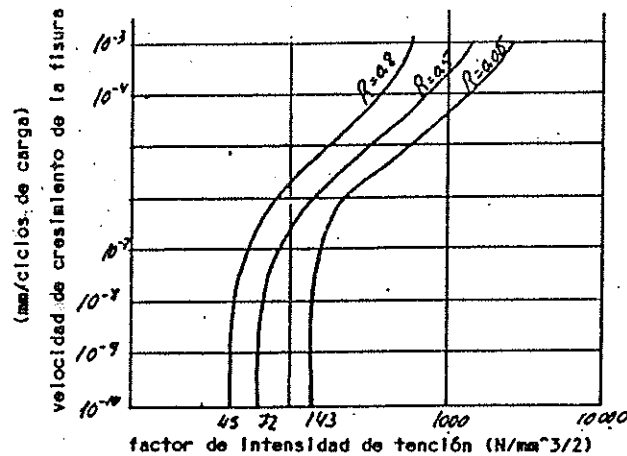


Fig. 8: En esta curva puede observarse la relación entre

el crecimiento de una fisura y el factor de intensidad de tensión

Ejemplo: como se puede ver en la figura, para prevenir la propagación de una fisura con  $R = 0.5$  y tensión =  $40 \text{ N/mm}^2$  los defectos superficiales más profundos de 2 mm. deben ser eliminados inmediatamente.

Para contribuir a la obtención de una vida más prolongada del rodete es preciso hacer controles periódicos y corregir los defectos que aparezcan, especialmente, durante el primer período de operación (500 horas).

Debe evitarse, dentro de lo posible, la aplicación del freno hidráulico. Todos los trabajos de reparación deben realizarse de manera que no creen estados de tensiones térmicas locales, por calentamiento, por soldadura no aliviada, entalladuras, golpes y otros defectos.

#### 1.4 INFLUENCIA EN EL RENDIMIENTO DE LA TURBINA

El rendimiento de una turbina está afectado por varios factores, tales como averías en el rodete, agujas, factores de diseño, de construcción del mismo y erosión por cavitación. El efecto de erosión por cavitación, para máquinas que deben prestar un servicio continuo y prolongado, es el más serio; puesto que con el tiempo puede conducir a la destrucción completa de partes vitales de la máquina: comúnmente las agujas y el rodete.

- 1.4.1 De una aguja se requiere:
- a) cierre hermético;
  - b) que en cada posición produzca un chorro de sección uniforme;
  - c) que, con pérdidas mínimas, regule cualquier valor de caudal deseado.

La deposición o pérdida de material que sufren las agujas forma superficies irregulares, haciendo que no se cumplan las condiciones anteriores, lo que provoca, como consecuencia, la pérdida de sello en las agujas, con lo cual distorsiona el chorro e impide formar la sección circular uniforme. Como resultado, se obtiene poco control en la regulación del caudal.

- 1.4.2 De un rodete se requiere:

- perfiles de los cangilones bien definidos y superficies bien pulidas, para que el chorro sea dividido en dos secciones simétricas y la salida del agua no provoque salpicaduras;

- debido a la pérdida de material en el perfil de los cangilones, cambiarán las condiciones originales de diseño y ésta puede causar vibraciones suficientemente serias cuando es muy avanzada, poniendo en peligro, inmediatamente, el funcionamiento mecánico de la Unidad Generadora, provocando, también, la ruptura completa del comportamiento hidráulico de la máquina.

#### **Efecto de Falaise**

Se entiende por "efecto de Falaise" un fuerte decrecimiento de la eficiencia y de la potencia de una Turbina Pelton con la apertura creciente de toberas.



El efecto de Falaise tiene dos orígenes, por un lado el vaciado insuficiente del cangilón entre los dos chorros y, por el otro, la influencia por el agua saliente sobre el chorro siguiente.

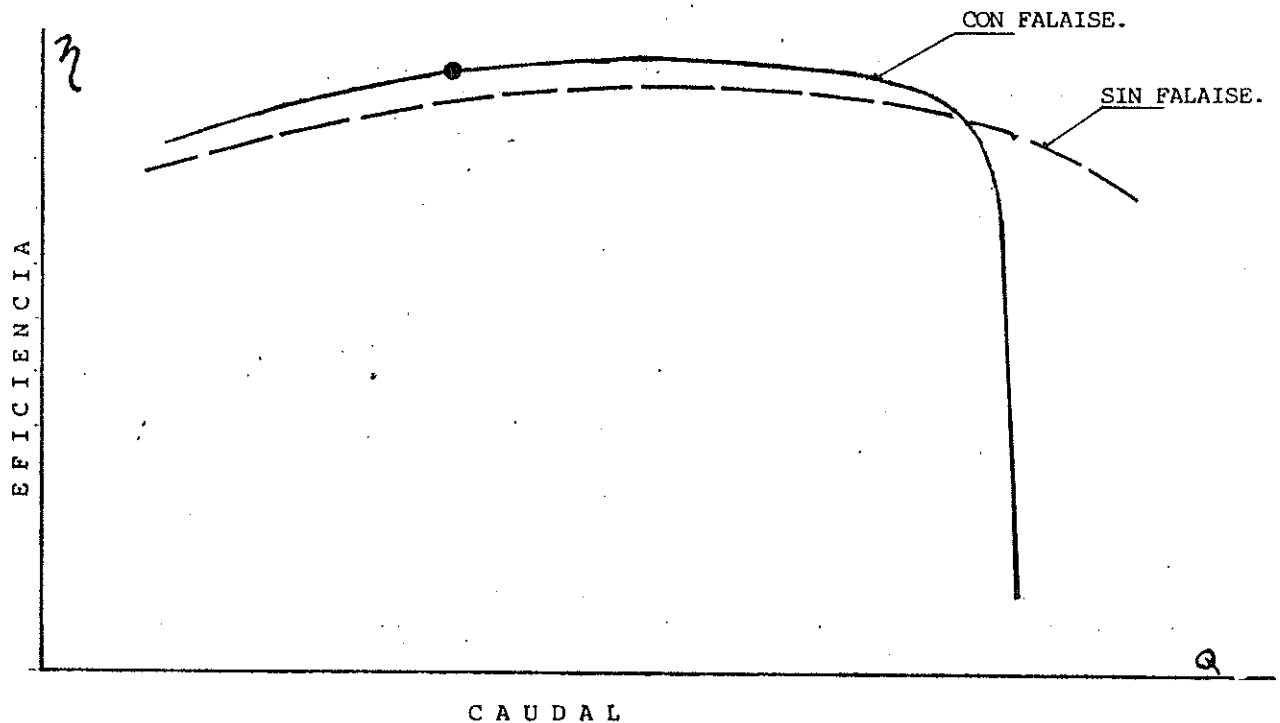


Fig. 9: Curva característica del efecto Falaise.

Los triángulos de velocidades de la Fig. 10 explican cómo la dirección de la velocidad absoluta señala en forma desfavorable hacia la tobera siguiente.

En comparación con el Diagrama de Colina completo (Fig. 10) las líneas de eficiencia  $\eta$  a elevados caudales y a caídas menores que las de diseño, son fuertemente restringidas.

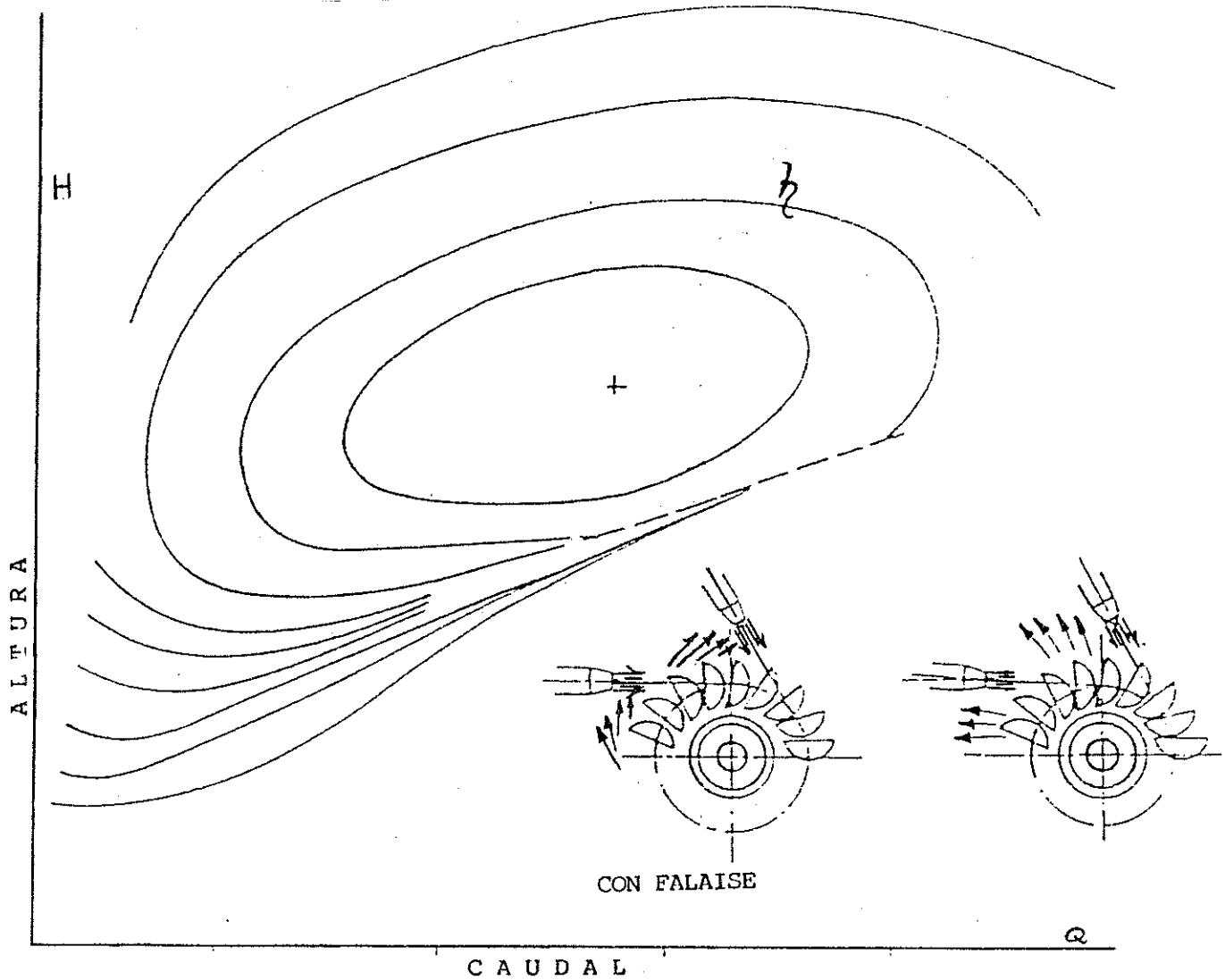


Fig. 10: Comportamiento de la eficiencia de la turbina con efecto Falaise.

Se puede concluir que, en una turbina Pelton, los efectos de cavitación causan una caída en el rendimiento y potencia de la Unidad Generadora, haciendo pasar mayor caudal de agua para obtener la misma potencia como si esto no ocurriera en condiciones normales de operación.

## 1.5 COMO MINIMIZAR EL EFECTO DE LA CAVITACION

Con lo expuesto hasta ahora se puede afirmar que la cavitación es un fenómeno que se debe enfrentar siempre y que, en muchos de los casos, resulta antieconómico evitarla por completo. Sin embargo, subsiste la necesidad de limitarla a valores mínimos.

Para tal objetivo, se dispone de los medios siguientes:

### 1.5.1 Medidas geométricas

Selección de un perfil del cangilón insensible a la cavitación; es decir, un perfil con altos coeficientes de presión.

Esto se obtiene mediante ensayos, elaborando diferentes tipos de perfiles en cada uno de los cangilones y poniendo en servicio la Unidad Generadora durante un período de 500 horas, tiempo durante el cual se podrá notar con claridad cuál fue el perfil menos afectado por la cavitación y, de acuerdo con esto, se elegirá un perfil definitivo. (Ver Anexo A).

### 1.5.2 Dimensionamiento de la máquina

Esto se hace con base en ensayos de modelo: selección de velocidad, cota de instalación, características de cavitación y observación cuidadosa de la aparición de burbujas en el modelo homólogo.

Luego, es decisivo determinar qué extensión de la cavitación sobre los álabes es permitida, para no sobrepasar el volumen de erosión prefijado. Debe considerarse toda una serie de aspectos, especialmente, los que se expondrán, más

adelante, como efectos de escala, concepto bajo el cual se resumen todos los efectos que, adicionalmente a las apariencias físicas mencionadas, influyen tanto en la cavitación como en la erosión por cavitación.

Como efectos de escala o, parcialmente, como pseudoefectos de escala, pueden denominarse todas aquellas desviaciones de las condiciones de semejanza geométrica elemental y cinemática, las cuales se evidencian en las formas siguientes:

- viscosidad,
- gravedad,
- efectos termodinámicos,
- influencia de la capa límite,
- impurezas en el líquido (contenidos sólidos y químicos).
- velocidad del sonido,
- desfase de tiempo,
- contenido de aire,
- dimensión geométrica,
- velocidad.

### 1.5.3 Modo de operación y mantenimiento

Puede limitarse la erosión por cavitación no cargando la turbina hasta el punto de volteo de potencia y, también, ateniéndose a los rangos de caídas y contra presiones fijadas en las especificaciones. Un mantenimiento regular también puede reducir el volumen de erosión, de modo que zonas que presenten erosión sean reparadas periódicamente y en concordancia con la manera de operación de la Unidad Generadora; lo cual significa que deben ser reparadas mediante aplicación de soldadura y pulidas hasta que las superficies queden lisas.

## C A P I T U L O   I I

**EVALUACION DEL DAÑO EN LOS RODETES****2.1 PROCEDIMIENTO DE INSPECCION VISUAL**

El primer ensayo no destructivo, básico para el control de defectos, es la inspección visual, después de una buena limpieza. El objeto de esta prueba es la determinación de fallas en la superficie, mediante personal experimentado. A ésta debe dársele la importancia y la calidad que requiere. Para realizarse es necesario tener:

- a) limpias las áreas a inspeccionar;
- b) buenas condiciones de iluminación;
- c) disposición adecuada;
- d) ayudarse con lupas o instrumentos multiplicadores.

La prueba visual se efectúa como primera medida, antes de las demás pruebas no destructivas y tiene por objeto determinar fallas mayores desde un principio, dentro de lo posible.

En las partes o piezas sometidas a poco esfuerzo puede considerarse la prueba visual como única y suficiente.

**2.2 PROCEDIMIENTO DE VERIFICACION DIMENSIONAL**

Los rodets Pelton están constituidos por un disco de acero con álabes periféricos en forma de doble cuchara, llamados también: cangilones. Estos pueden ser fundidos conjuntamente con el disco, formando una sola pieza o fijados individualmente al disco por medio de tornillos.

Para el caso específico de la Central Hidroeléctrica Aguacapa y demás Centrales del INDE, son de una sola pieza, fundidos al disco.

La forma tradicional de construcción fue, hasta hace pocos años, la fundición por separado del disco y de los

cangilones. Esto facilitaba, fundamentalmente, la fundición, el maquinado y el pulido de las piezas en reconstrucción; así como el reemplazo de los cangilones cuando su deterioro lo requería.

Sin embargo, en épocas más recientes, se ha desarrollado predominantemente el fundido de una sola pieza, con lo cual se obtiene mayor rigidez, solidez; mayor uniformidad de resistencia y más facilidad en el montaje. Esto ha sido posible, principalmente, gracias a los avances en las técnicas de fundición y de control de calidad.

El número de cangilones del rodete suele ser de 17 a 26, dependiendo de la velocidad específica de la turbina (ns). Para altas velocidades, el número de cangilones es menor. Cuando el caudal turbinado es mayor, se requieren cangilones de mayor dimensión y caben menos para un mismo diámetro.

El espacio requerido por cada cangilón suele oscilar entre  $1.4 \times d_o$  y  $1.6 \times d_o$ , siendo " $d_o$ " el diámetro del chorro.

En cualquier caso, el número de cangilones debe ser tal que el agua proveniente del chorro no tenga lugar a pasar entre dos cangilones sin acción sobre uno de ellos.

La forma del cangilón, como se mencionó, es de doble cuchara, con una arista media, donde se produce el ataque del chorro de agua.

El perfil del cangilón se define con base en la experimentación y en los criterios que se han fijado con la experiencia, como se explicó con anterioridad.

Los aspectos esenciales que deben tomarse en consideración para una verificación dimensional, son los siguientes:

- ángulos de la arista " $\alpha$ ",
- ángulo de descarga " $\beta$ ",

- la forma y el tamaño del perfil,
- ancho de la escotadura "L",
- ancho del cangilón "E",
- largo del cangilón "g",
- altura de las descargas o profundidad del cangilón "A",
- espesor del cangilón "e".

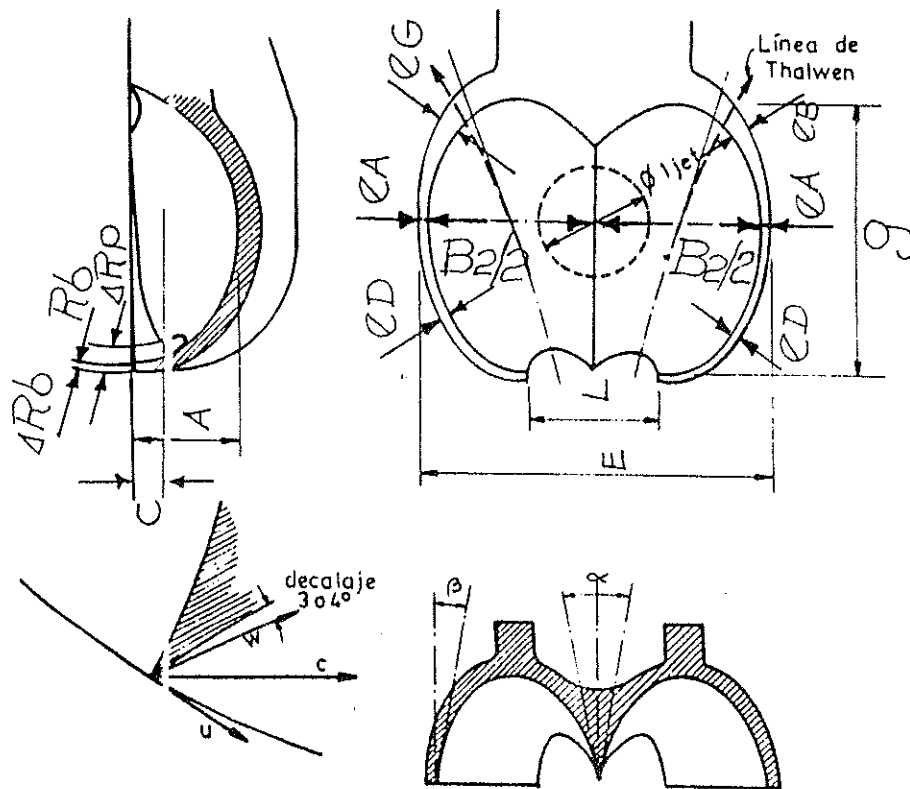


Fig. 11: Dimensionamiento del cangilón

| CONTROL DIMENSIONAL DE LOS CANGILONES |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
|---------------------------------------|-------------|----------|----------|----------|-----------|----|----|---|--------------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|---|
| CAN-<br>GILON                         | E2/2<br>(i) | A<br>(d) | A<br>(i) | A<br>(d) | Rb<br>(d) | Rb | Rp | C | B            | $\phi$ | eA<br>(i) | eA<br>(d) | eD<br>(i) | eD<br>(d) | eG<br>(i) | eG<br>(d) | L | E |
| 1                                     |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| 2                                     |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| 3                                     |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| 4                                     |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| 5                                     |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| 6                                     |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| 7                                     |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| 8                                     |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| 9                                     |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| 10                                    |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| 11                                    |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| 12                                    |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| 13                                    |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| 14                                    |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| 15                                    |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| 16                                    |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| 17                                    |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| 18                                    |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| 19                                    |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| 20                                    |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| MATERIAL DEL RODETE:                  |             |          |          |          |           |    |    |   | FUNDIDO POR: |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| CONTROL EJECUTADO POR:                |             |          |          |          |           |    |    |   | FECHA:       |        |           |           |           |           |           |           |   |   |
| OBSERVACIONES: _                      |             |          |          |          |           |    |    |   |              |        |           |           |           |           |           |           |   |   |



## 2.3 PROCEDIMIENTO PARA LA INSPECCION POR LIQUIDOS PENETRANTES EN LOS CANGILONES

El resultado de estos ensayos depende mucho de la forma cómo se realicen. Para obtener resultados aceptables, se especifica en un procedimiento los aspectos esenciales que influyen en el ensayo.

Esta especificación está limitada al ensayo de líquidos penetrantes para piezas fundidas y para superficies soldadas en éstas, cuando se encuentran adecuadamente limpias.

El objeto de este ensayo, por colorantes, es la determinación de fallas en la superficie de los cangilones.

### 2.3.1 Procedimiento de limpieza

La primera etapa a ser ejecutada en la realización del ensayo es la verificación de las condiciones superficiales de los cangilones.

En caso de que la superficie sea lisa, no habrá necesidad de ninguna preparación previa.

Superficies excesivamente rugosas o porosas, tal como las superficies cavitadas, requieren una preparación previa, pues las irregularidades superficiales pueden perjudicar la correcta aplicación del penetrante; éstas, además, provocarán el enmascaramiento de los resultados.

Las superficies deben estar limpias y secas, libres de polvo, óxidos, cascarilla, pintura, aceites, grasas u otras impurezas que dificulten la penetración del colorante o la segura determinación de la falla. Es, por tanto, necesario que en estos casos haya una preparación previa, por medios mecánicos tales como:

- cepillos,
- lijas,

- rasquetas, etc.

En este caso de inspección manual, la limpieza se obtiene rápidamente.

Se puede utilizar el solvente, que es parte de los kits de ensayo o solvente en galón, generalmente:

- Thinner,
- Tricloroetileno o similares.

En este caso se debe dar un tiempo mínimo de 15 minutos de secado, para que el solvente utilizado se evapore de las eventuales fallas. Para mejores resultados, se aplicará aire comprimido seco y limpio.

El tiempo de secado dependerá de la temperatura ambiente; este tema se ampliará más adelante.

### 2.3.2 Forma y aplicación del líquido penetrante

El penetrante será aplicado con spray, pinceles o pistola con aire comprimido, cuando la superficie esté totalmente limpia y seca.

El tiempo de penetración del líquido será de un mínimo de 10 minutos.

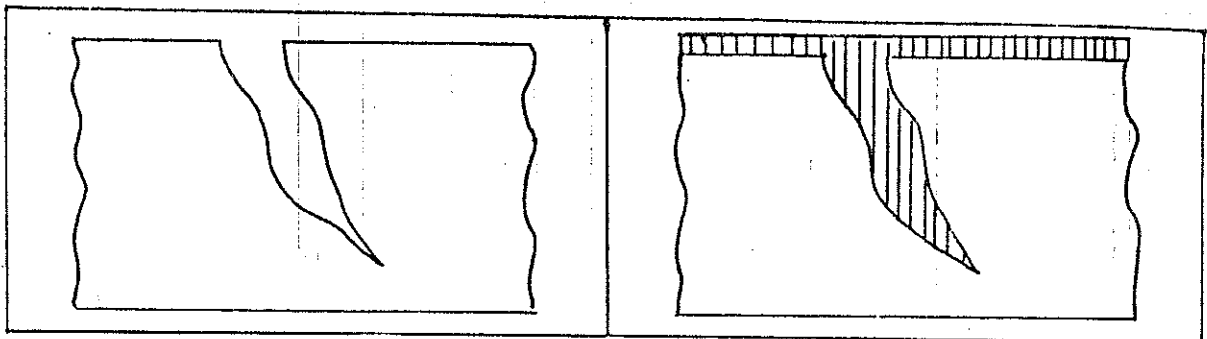


Fig. 12: Discontinuidades y aplicación del penetrante.

## TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE Y LIQUIDO PENETRANTE

Durante la ejecución del examen, la temperatura debe estar dentro de un rango de 16°C a 52°C.

## REMOCION DEL EXCESO DE LIQUIDO PENETRANTE

Para penetrantes removibles con agua, el exceso de penetrante deberá ser removido con pulverización de agua sobre la superficie en examen; la temperatura del agua no debe exceder de 46°C, con una presión máxima de 50 PSI.

Para penetrantes removibles con solvente, el exceso de penetrante debe ser removido, inicialmente, con trapos limpios y secos; posteriormente, se utilizarán trapos levemente humedecidos con removedor. Los trapos utilizados no deben soltar hilos, mota, ni contener aceites y grasas.

No se debe usar exceso de removedor sobre la superficie en examen, pues, esto diluiría el líquido penetrante aplicado y provocará el enmascaramiento de las fallas.

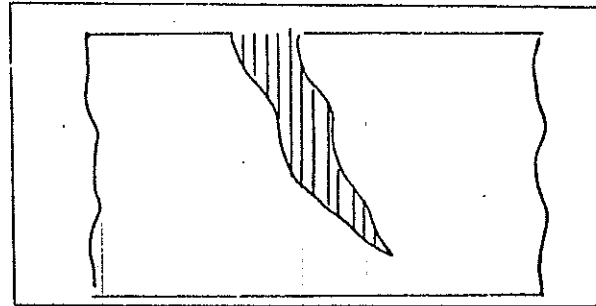


Fig. 13: Remoción del exceso de penetrante

## TIEMPO DE SECADO ANTES DE LA APLICACION DEL REVELADOR

Antes de aplicar el revelador deberá esperarse un mínimo de 5 minutos, para que la superficie quede completamente seca, por evaporación natural.

## APLICACION DEL REVELADOR

El revelador líquido debe aplicarse mediante botes tipo spray o, en superficies muy grandes, con pistola y aire comprimido, formando una película adecuada para el examen.

Para la aplicación del revelador en spray, debe agitarse fuertemente el recipiente, para asegurar la dispersión de las partículas en suspensión.

Cuando el revelador se aplique con pistola y aire comprimido, debe tenerse el cuidado de colocar filtros en la línea de aire, para retener los condensados y evitar la contaminación del revelador así como del líquido penetrante.

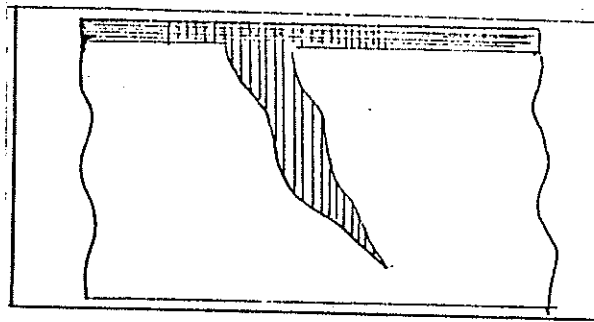


Fig. 14: Aplicación del revelador

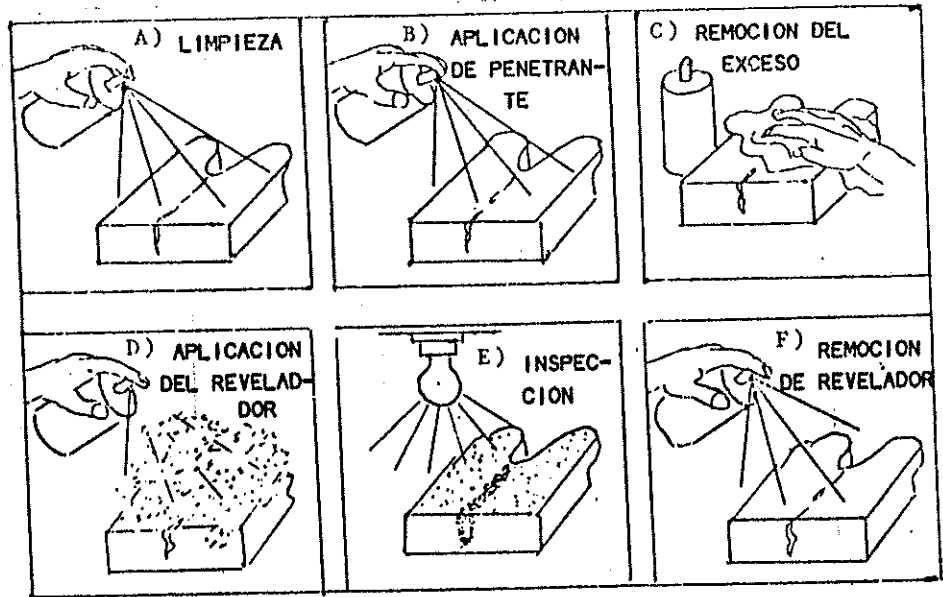


Fig. 15: Secuencia del ensayo

#### INSPECCION DE INDICACIONES

Entre 10 y 30 minutos después de aplicado el revelador debe realizarse una inspección de las indicaciones que aparezcan.

Para hacer estas inspecciones, la iluminación mínima para penetrantes coloridos o rojos debe ser de 350 luxes, lo que hace necesario, entonces, una lámpara de 60 Watt, a una distancia de 40 cms. de la superficie en inspección.

Si los líquidos fueran fluorescentes, la iluminación debe ser de 32 luxes con lámpara de luz negra filtrada.

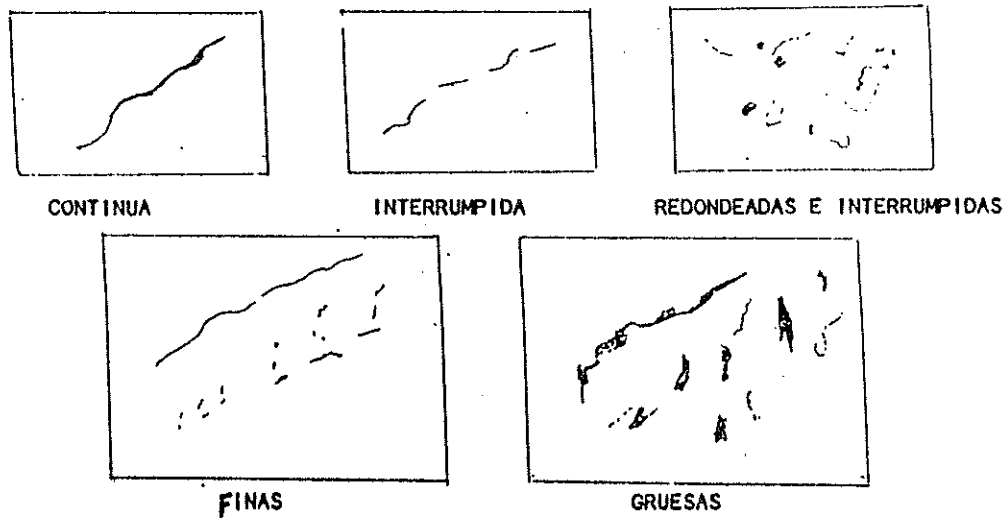


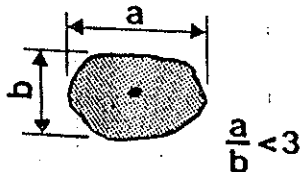
Fig. 16: Indicaciones típicas

### 2.3.3 Clasificación y evaluación de las indicaciones

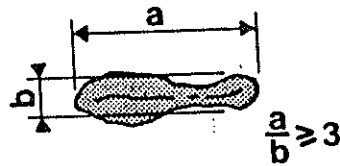
Las indicaciones se clasifican de la siguiente manera:

- a) redondeadas,
- b) lineales o alargadas,
- c) alineadas.

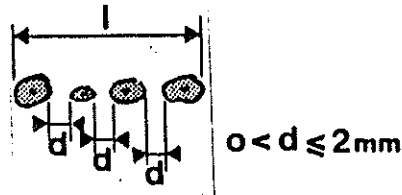
- a) REDONDEADAS (Fig. 17): son todas aquellas indicaciones que tienen una longitud menor que tres veces el ancho.



- b) LINEALES O ALARGADAS (Fig. 18): son todas aquellas indicaciones que tienen una longitud mayor o igual que tres veces el ancho.



- c) ALINEADAS (Fig. 19): serán consideradas alineadas cuando estén dispuestas en línea tres o más indicaciones con distancias de 2 mm.



#### CRITERIO DE ACEPTACION

Se aplicará el criterio expresado en cinco clases, las cuales se definen de la siguiente manera:

##### CLASE 1

1. Ninguna indicación circular con dimensión de  $a > 3$  mm.
2. Ninguna indicación lineal.
3. Ninguna alineada.
4. Superficie total de las indicaciones menor o igual a  $10 \text{ mm}^2/\text{dm}^2$ .

En la práctica, el área de inspección será evaluada por la comparación visual directa, con la referencia del cuadro de abajo (Fig. 20), el cual representa una superficie de  $1 \text{ dm}^2$ . Esta área superficial puede ser un cuadrado o un rectángulo; su máxima comparación será colocada de tal manera que la más ventajosa repartición de las

indicaciones contenidas en el área comparada sean tomadas en cuenta.

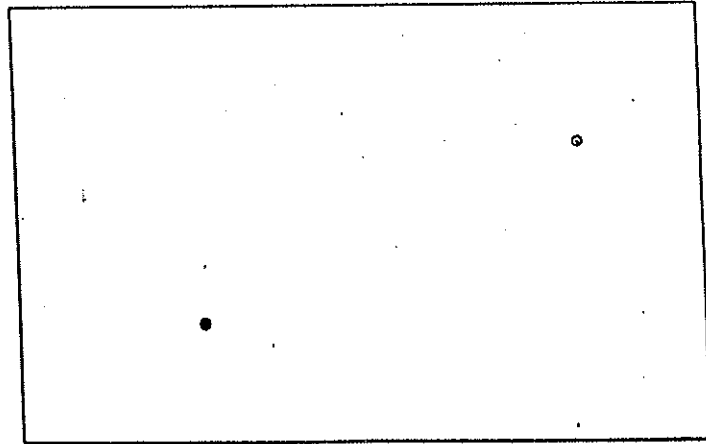


Fig. 20: Este ejemplo muestra 2 indicaciones con una superficie total de 6.3 mm<sup>2</sup>.

#### CLASE 2

1. Ninguna indicación circular con dimensión de  $a > 4$  mm.
2. Ninguna indicación lineal.
3. Ninguna indicación alineada.
4. Superficie total de las indicaciones menor o igual a 20 mm<sup>2</sup>/dm<sup>2</sup>.

En la práctica, el área de inspección será evaluada por comparación visual directa con la referencia del cuadro de abajo (Fig. 21), el cual representa una superficie de 1 dm<sup>2</sup>; esta área superficial puede ser un cuadrado o un rectángulo, su máxima longitud, sin embargo, no debe exceder de 250 mm. La superficie en comparación será colocada de tal manera que la más ventajosa repartición de las indicaciones contenidas en el área comparada sean tomadas en cuenta.



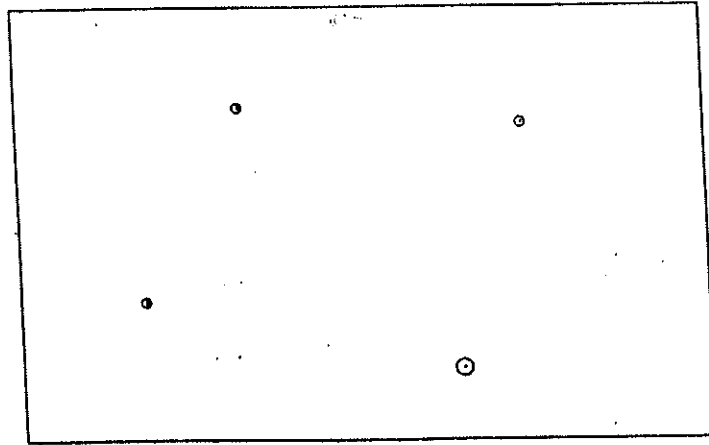


Fig. 21: Muestra 4 indicaciones con una superficie de 16 mm<sup>2</sup>.

### CLASE 3

1. Ninguna indicación circular con dimensión de  $a > 5\text{mm}$ .
2. Ninguna indicación lineal.
3. Ninguna indicación alineada.
4. Superficie total de las indicaciones menor o igual a 20 mm<sup>2</sup>/dm<sup>2</sup>.

En la práctica, el área de inspección será evaluada por comparación visual directa con la referencia del cuadro de abajo (Fig. 22), el cual representa una superficie de 1 dm<sup>2</sup>; esta área superficial puede ser un cuadrado o un rectángulo, su máxima longitud, sin embargo, no debe exceder de 250 mm. La superficie en comparación será colocada de tal manera que la más ventajosa repartición de las indicaciones contenidas en el área comparada sean tomadas en cuenta.

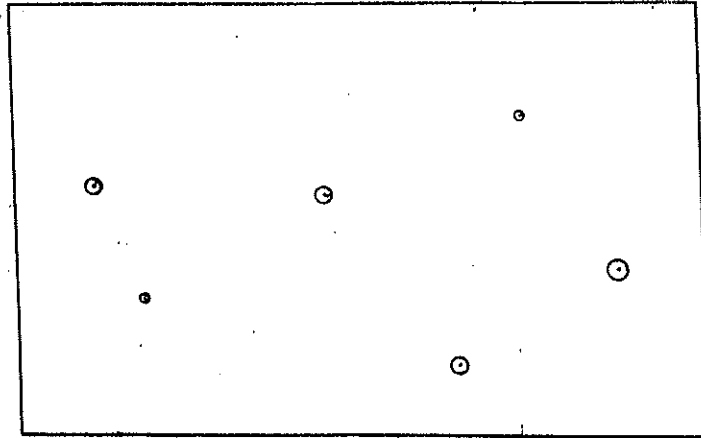


Fig. 22: Muestra 6 indicaciones con una superficie total de 40 mm<sup>2</sup>.

#### CLASE 4

1. Ninguna indicación circular con dimensión de  $a > 6$  mm.
2. Ninguna indicación lineal.
3. Ninguna indicación alineada con longitud  $l > 10$  mm.
4. Superficie total de las indicaciones menor o igual a 125 mm<sup>2</sup>/dm<sup>2</sup>.

En la práctica, el área de inspección será evaluada por comparación visual directa, con la referencia del cuadro de abajo (Fig. 23) el cual representa una superficie de 1 dm<sup>2</sup>; esta área superficial puede ser un cuadrado o un rectángulo, su máxima longitud, sin embargo, no debe exceder de 250 mm. La superficie en comparación será colocada, de tal manera, que la más ventajosa repartición de las indicaciones contenidas en el área comparada sean tomadas en cuenta.

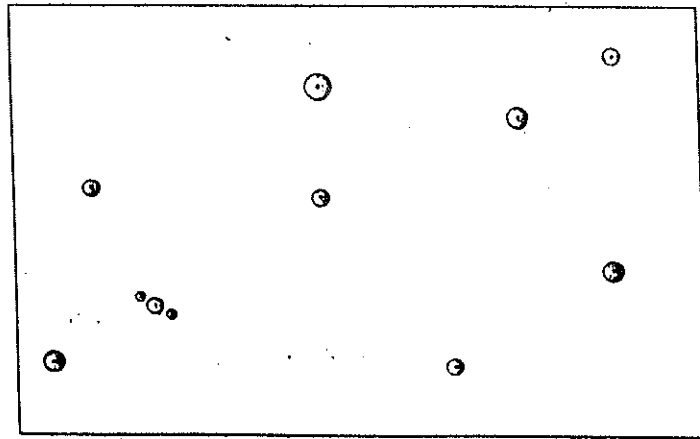


Fig. 23: Muestra 11 indicaciones con una superficie total de 100 mm<sup>2</sup>.

#### CLASE 5

1. Ninguna indicación circular con dimensión de  $a > 8$  mm.
2. Ninguna indicación lineal con longitud de  $a > 7$  mm.
3. Ninguna indicación alineada con longitud de 10 mm.
4. Superficie total de las indicaciones menor o igual a 250 mm<sup>2</sup>/dm<sup>2</sup>.

En la práctica, el área de inspección será evaluada por comparación visual directa, con la referencia del cuadro de abajo (Fig. 24), el cual representa una superficie de 1 dm<sup>2</sup>; esta área superficial puede ser un cuadrado o un rectángulo, su máxima longitud, sin embargo, no debe exceder de 250 mm. La superficie en comparación será colocada, de tal manera, que la más ventajosa repartición de las indicaciones contenidas en el área comparada sean tomadas en cuenta.

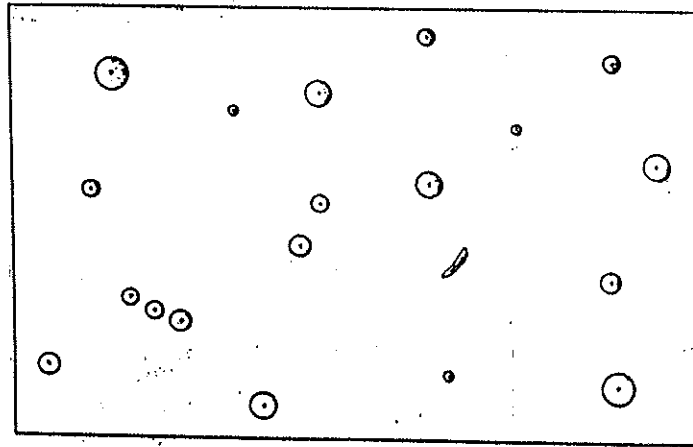


Fig. 24: Muestra 20 indicaciones con una superficie de 250 mm<sup>2</sup>.

NO SE ADMITEN:

- a) indicaciones circulares de más de 10 mm. de diámetro;
- b) indicaciones lineales de más de 5 mm. de longitud, cuando están orientadas en dirección transversal al esfuerzo principal;
- c) indicaciones alineadas de más de 10 mm. de longitud, cuando están orientadas en dirección al esfuerzo principal.

Luego de haber conocido ampliamente los criterios de aceptación de las indicaciones que marcan los líquidos penetrantes, serán desarrollados los procedimientos de inspección en el rodete, para evaluar los daños en los cangilones.

#### 2.3.4 Clasificación de los líquidos penetrantes

Los líquidos penetrantes se clasifican de acuerdo con los métodos o tipos, conforme a la tabla siguiente:

| TIPO         | CLASIFICACION           |          |                            |              |
|--------------|-------------------------|----------|----------------------------|--------------|
|              | EN CUANTO A VISIBILIDAD | CON AGUA | AGUA, DESPUES EMULSIFICADO | CON SOLVENTE |
| FLUORESCENTE | A                       | A-1      | A-2                        | A-3          |
| COLORANTE    | B                       | B-1      | A-2                        | B-3          |

Tipo A: Penetrante fluorescente  
 Tipo A-1: Removible con agua  
 Tipo A-2: Removible con agua luego emulsificado  
 Tipo A-3: Removible con solvente

TIPO B: Penetrante  
 TIPO B-1: Removible con agua  
 TIPO B-2: Removible con agua luego emulsificado  
 TIPO B-3: Removible con solvente

#### 2.3.5 Forma de reportar los resultados obtenidos

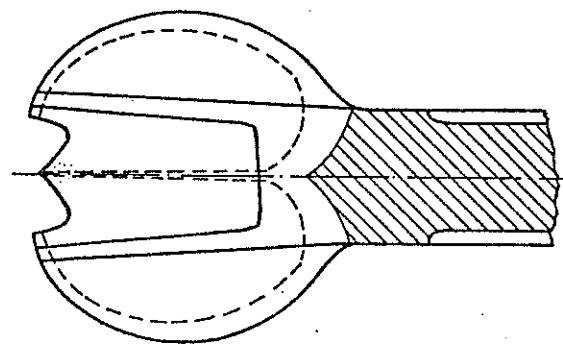
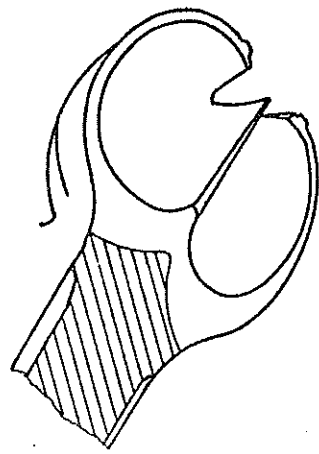
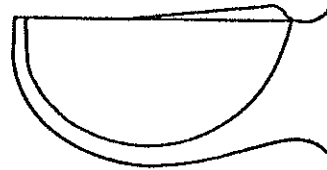
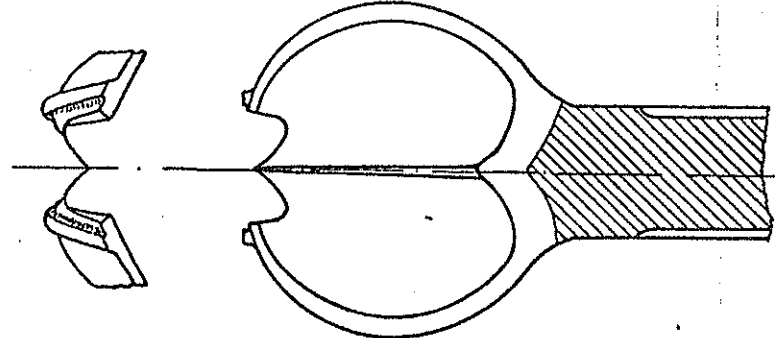
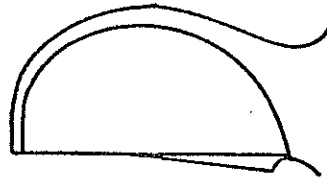
RESULTADOS: ver la página siguiente, con el formato que contiene los registros correspondientes del ensayo adjunto con el croquis de los relevados efectuados sobre 1 cangilón.

## INSTRUCCIONES

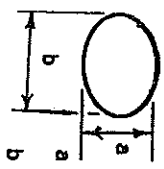
Sobre el croquis de cada cangilón representar los defectos encontrados e indicar de manera precisa su posición y dimensión (diámetro y profundidad). En caso de excavación, indicar la profundidad de la cavidad necesaria para eliminar completamente el defecto.

Bajo observaciones, indicar las comprobaciones hechas y las decisiones tomadas para reparar los defectos.

|  |            |                |  |             |
|--|------------|----------------|--|-------------|
| HIDROELECTRICA ABUACAPA.- INDE.  |            |                |  |             |
| LIQUIDO PENETRANTE<br>REGISTRO DE RESULTADOS DEL EXAMEN POR LIQUIDOS PENETRANTES |            |                |  |             |
| FABRICANTE   | COMPONENTE | PROC/UTILIZADO | NORMA DE REF.  |             |
|  |            |                |  |             |
| No/CANGILON  | P/LIMPIEZA | PENETRANTE     | REMOVEDOR  | REVELADOR   |
|  |            |                |  |             |
| DISCONTINUIDADES.  |            |                | RESULTADO<br><br>FL-fisura longitudinal<br><br>FT-fisura transversal<br><br>PO-porosidad<br><br>MO-mordedura<br><br>SP-sobreposición<br><br>FF-falta de fusión<br><br>FP-falta de penetración<br><br>A-aprovado<br><br>R-reprovado |             |
| No.  | TIPO       | POSICION (mm)  |  | TAMAÑO (mm) |
| 1  |            |                |  |             |
| 2  |            |                |  |             |
| 3  |            |                |  |             |
| 4  |            |                |  |             |
| 5  |            |                |  |             |
| 6  |            |                |  |             |
| 7  |            |                |  |             |
| 8  |            |                |  |             |
| 9  |            |                |  |             |
| 10   |            |                |  |             |
| RESULTADO FINAL  | ENSAYO No. | VISTO BUENO    | FECHA  |             |
|  |            |                |  |             |
| OBSERVACIONES:   |            |                |  |             |



**DIMENSIONES DE LAS FALLAS**



a x b x c

a = ancho medio

b = largo medio

c = profundidad media

dimensiones dadas en mm.

**CROQUIS DE DEFECTOS**

CANGILON No. \_\_\_\_\_



## 2.4 PROCEDIMIENTO PARA LA INSPECCION POR PARTICULAS MAGNETICAS

Este método sirve para detectar la presencia de fisuras y recubrimientos, rayones, inclusiones y discontinuidades semejantes en materiales ferromagnéticos, como el hierro y el acero. El método detectará discontinuidades de la superficie demasiado finas para apreciarse a simple vista y, también, detectará discontinuidades ligeramente por abajo de la superficie, aproximadamente, a 3 mm.

### LIMITANTES DE APLICACION

Este método de prueba es aplicable, únicamente, a materiales ferromagnéticos.

### DESCRIPCION DEL METODO

La inspección por partículas magnéticas se lleva a cabo mediante la magnetización del área a ensayarse, cubriéndola con finas partículas magnéticas (polvo de hierro). La presencia de una discontinuidad se evidencia por la formación y adherencia de un arreglo característico de las partículas sobre la discontinuidad en la superficie del área de ensayo. Este arreglo recibe el nombre de indicación y adquiere la forma aproximada de la proyección superficial de la discontinuidad.

Cuando la discontinuidad está abierta a la superficie, el campo magnético se fuga hacia la superficie y forma pequeños polos, Norte y Sur, que atraen a las partículas magnéticas. Cuando pequeñas discontinuidades están bajo la superficie, alguna parte del campo aún podría desviarse, pero, la fuga es menor y se atraen menos partículas, con lo que la indicación obtenida es mucho más débil.

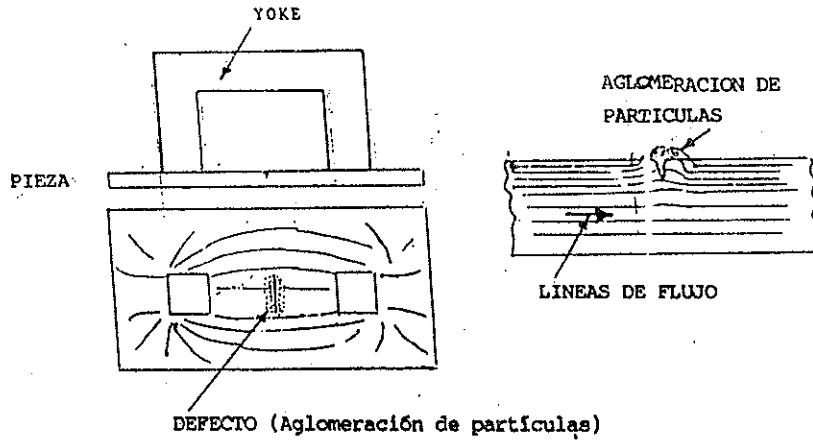


Fig. 25: Localización de defectos.

#### GENERACION DEL CAMPO MAGNETICO

Generalmente, se trabaja con corriente alterna, aunque hay modelos de máquinas para la generación del campo magnético, capaces de rectificar la corriente alterna en corriente directa. La corriente directa es más sensible que la alterna para detectar discontinuidades no abiertas a la superficie; la corriente alterna se utiliza, exclusivamente, para detectar discontinuidades abiertas a la superficie.

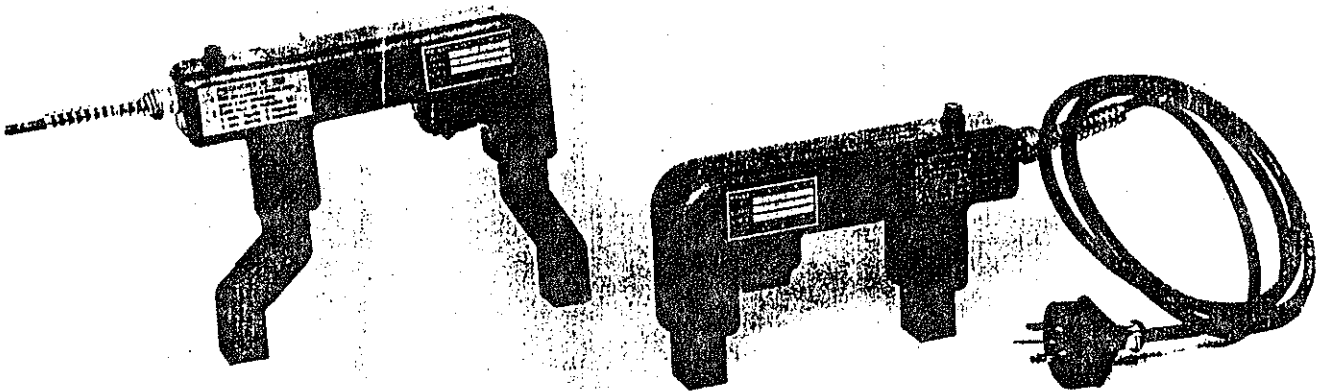


Fig. 26: Máquinas portátiles (Yokes) para detectar discontinuidades superficiales y sub-superficiales en materiales ferromagnéticos.

## CAPITULO III

**REPARACION DE LOS CANGILONES  
DEPENDIENDO DE LAS FALLAS  
QUE PRESENTEN****3.1 ANALISIS DE FALLAS**

El análisis de fallas debe hacerse con base en la clasificación y evaluación de las indicaciones de los líquidos penetrantes y partículas magnéticas ya realizadas; considerándose la clase a la que corresponden.

Se deben considerar cuatro parámetros importantes:

- a) longitud de la fisura,
- b) área,
- c) posición,
- d) profundidad.

La profundidad de las fisuras se determinará con el ensayo de partículas magnéticas, para una profundidad máxima de 3 mm.; como se indicó con anterioridad.

**NO SE ADMITIRAN**

- a) indicaciones lineales en gargantas, bordes y en sus cercanías (en una zona de 20 mm. de proximidad);
- b) indicaciones lineales con más de 3 mm. de longitud, en gargantas fuera de bordes;
- c) indicaciones lineales con más de 10 mm. de longitud, dentro de las superficies menos curvas (deflectada);
- d) indicaciones circulares con más de 10 mm. de diámetro (después de 10 minutos de desarrollo);
- e) acumulación de indicaciones con más de 6 mm. de diámetro, en una densidad con más de 20 por dm<sup>2</sup>.

La forma de controlar este tipo de imperfecciones se detallará más adelante.

### 3.2 TIPOS DE REPARACIONES

Estas pueden ser: por recargo de soldadura, luego amolado y pulido o solamente pulido; dependerá de la gravedad de la falla, por lo que es necesario conocer los procesos más aplicables de soldadura para la reparación de rodets Pelton ya que serán utilizados de conformidad con la disponibilidad de los equipos y de los conocimientos que de los mismos se tenga.

#### 3.2.1 Soldadura con arco de electrodo revestido

##### FUNDAMENTOS DEL PROCESO

La soldadura con electrodo revestido (SMAW) es la unión de metales por el calentamiento proveniente de un arco eléctrico entre un electrodo revestido y el metal base, en una junta a soldar.

El metal fundido del electrodo es transferido a través del arco hacia la poza de fusión del metal base, formando así el metal de soldadura depositado.

Una escoria, formada por el revestimiento del electrodo y las impurezas del metal base, fluye hacia la superficie y cubre el depósito, protegiéndolo de la contaminación atmosférica y, también, controlando la velocidad de enfriamiento; el metal de aporte viene del alma metálica del electrodo (alambre) y del revestimiento que, en algunos casos, está constituido de polvo de hierro y elementos de aleación.

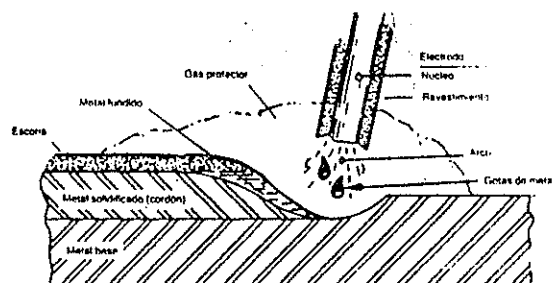


Fig. 27: Soldadura con electrodo revestido.

La soldadura con electrodo revestido es el proceso de soldadura más utilizado, debido a la simplicidad del equipo que se utiliza, a la resistencia y calidad de las soldaduras, a lo que se suma el bajo costo. Este proceso tiene gran flexibilidad y suelda la mayoría de los metales, en una gran gama de espesores.

La soldadura con este proceso puede hacerse en casi todos los lugares y en condiciones extremas.

La soldadura con electrodo revestido se usa extensivamente en la fabricación industrial, edificios, barcos, etc.

#### EQUIPO DE SOLDADURA

El proceso de soldadura con electrodo revestido, usualmente, se opera de manera manual.

Como se puede observar en la Fig. 28, el equipo consiste en una fuente de energía, cable de conexión eléctrica, un porta-electrodo (tenaza de electrodo), un conector de tierra y el electrodo.

##### a) Fuente de energía

La fuente de energía puede ser tanto de corriente alterna como de corriente continua con electrodo negativo (polaridad directa) o de corriente continua con electrodo positivo (polaridad inversa), dependiendo de las exigencias del trabajo.

Corriente continua, polaridad directa: la pieza se conecta al polo positivo y el electrodo al negativo. El bombardeo de electrones se produce en la pieza, la cual será la parte más caliente.

Corriente continua, polaridad inversa: el electrodo será el positivo y la pieza negativa. El bombardeo de electrones se dará en el alma del electrodo, la cual será la parte más caliente.

b) Cables de soldadura

Se usan para conectar el porta-electrodo y la mordaza a la fuente de energía. Estos deben ser flexibles, para permitir la fácil manipulación, especialmente el porta-electrodo. Forman parte del circuito de la soldadura y están formados por varios hilos de cobre enrollados juntos y protegidos por un revestimiento aislante y flexible (normalmente hule sintético).

c) Porta-electrodo

Es, simplemente, una tenaza que permite al soldador controlar y asegurar el electrodo.

d) Mordaza (conector de tierra)

Es el dispositivo para conectar el cable de tierra a la pieza que se va a soldar.

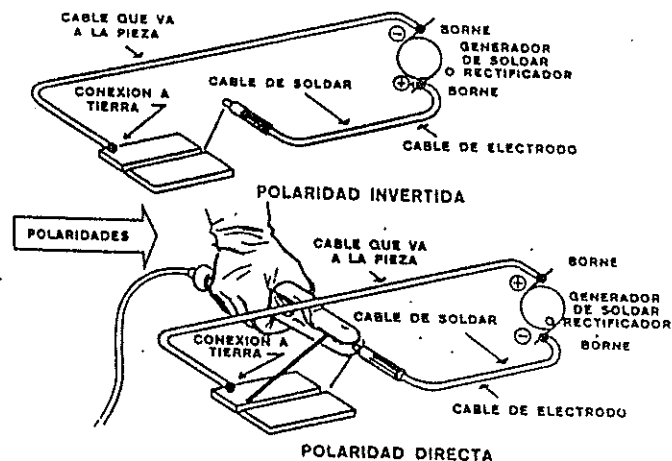


Fig. 28: Equipo de soldadura con electrodo revestido.

## TIPOS Y FUNCIONES DE LOS CONSUMIBLES

El electrodo, en el proceso de soldadura con electrodo revestido, tiene varias funciones importantes. Este establece el arco y entrega el metal de aporte para la soldadura. El revestimiento del electrodo también tiene funciones importantes en la soldadura. Didácticamente, se pueden clasificar en funciones eléctricas, físicas y metalúrgicas.

## a) FUNCIONES ELECTRICAS DE AISLAMIENTO E IONIZACION

- Aislamiento: el revestimiento es un mal conductor de electricidad, de esta manera aísla el alma del electrodo, evitando la abertura lateral del arco. Orienta la abertura del arco en la dirección requerida.
- Ionización: el revestimiento contiene silicatos de sodio (Na) y potasio (K) que ionizan la atmósfera del arco. La atmósfera ionizada facilita el paso de corriente eléctrica, dando origen a un arco estable.

## b) FUNCIONES FISICAS Y MECANICAS

Produce gases para la formación de la atmósfera protectora de las gotitas de metal, contra la acción del hidrógeno y el oxígeno de la atmósfera.

El revestimiento se funde y después se solidifica sobre el cordón de soldadura, formando una escoria de material no metálico que protege el cordón de soldadura de la oxidación por la atmósfera normal, cuando la soldadura está enfriando.

Proporciona el control de la tasa de

enfriamiento; contribuye en el acabado del cordón.

c) FUNCIONES METALURGICAS

Puede contribuir con elementos de aleación, de manera que pueden alterar las propiedades de la soldadura.

Los electrodos revestidos son clasificados de acuerdo con las especificaciones de la AWS.

#### CARACTERISTICAS Y APLICACIONES DE LA SOLDADURA

Es importante para el inspector de soldadura recordar que el proceso de soldadura con electrodo revestido tiene muchas variables a considerar; por ejemplo, éste puede ser usado en una amplia variedad de configuraciones de juntas encontradas en la soldadura industrial y en una amplia variedad de combinaciones de metal base y metal de aporte. Ocasionalmente, varios tipos de electrodos son usados para una soldadura específica. El inspector de soldadura debe tener conocimiento profundo sobre la especificación usada para el servicio, para saber cómo y qué variables afectan la calidad de la soldadura.

El proceso de soldadura con electrodo revestido puede usarse para soldadura en todas posiciones. Este puede ser usado para soldadura en la mayoría de los aceros y algunos de los metales no férricos como, también, para deposición superficial de metal de aporte para, así, obtener determinadas propiedades o dimensiones.

Presenta la posibilidad de soldar metal base en un rango de 2 mm. hasta 200 mm., dependiendo del calentamiento o requisitos de control de la



distorsión y de la técnica utilizada.

El control de la energía de la soldadura (heat input) durante la operación, es un factor relevante en algunos materiales, tales como los aceros templados y revenidos, aceros inoxidable y aceros con baja aleación conteniendo molibdeno. El control inadecuado de la energía durante la operación fácilmente puede causar fisuras o pérdida de resistencia a la corrosión en aceros inoxidable. La tasa de deposición de este proceso es pequeña, comparada con otros procesos de alimentación continua. La tasa de deposición varía de 1 a 5 Kg/hora y depende del electrodo escogido.

El buen resultado del proceso de soldadura con electrodo revestido depende mucho de la habilidad y de la técnica del soldador, pues, toda la manipulación de la soldadura es manejada por él.

Existen cuatro aspectos que el soldador debe controlar con habilidad:

1. largo del arco,
2. ángulo del electrodo,
3. velocidad de avance,
4. amperaje.

#### PREPARACION Y LIMPIEZA DE LAS PARTES

Las partes a ser soldadas deben estar exentas de aceite, grasa, óxido, tinta, residuos del examen por líquidos penetrantes y residuos del precalentamiento con gas, en un rango de no menos de 20 mm. de cada lado de los bordes a soldar.

## DISCONTINUIDADES INDUCIDAS POR EL PROCESO

La soldadura obtenida con electrodo revestido puede contener casi todo tipo de discontinuidades. Las más comunes, cuando se usa este proceso, son:

1. **POROSIDAD:** de un modo general, es causada por el empleo de técnicas incorrectas, por inadecuada limpieza en el metal base o por humedad en el electrodo. La porosidad agrupada ocurre, a veces, en el inicio y fin del arco. La técnica de soldadura con un pequeño pase para otros, inmediatamente después de iniciar la operación de soldadura permite al soldador refundir el área de inicio del cordón, liberando el gas de éste y evitar, así, este tipo de discontinuidades. La porosidad en forma de gusano ocurre, generalmente, por el uso de electrodo húmedo.
2. **INCLUSIONES:** son provocadas por la manipulación inadecuada del electrodo y por la deficiente limpieza entre pasos.
3. **FALTA DE FUSION Y/O FALTA DE PENETRACION:** resulta de una técnica inadecuada de soldadura, tal como una soldadura muy rápida o demasiado lenta; preparación inadecuada del área o del material o corriente demasiado baja.
4. **SOCAVAMIENTO, MORDEDURA O SOBREPOSICION:** se deben a errores del soldador.
5. **FISURA INTERLAMINAR:** esta discontinuidad no obedece a fallas del soldador. Ocurre cuando el metal base no soporta tensiones elevadas, generadas por la contracción de la soldadura en la dirección del espesor, se fisura en forma de gradas, situadas en planos paralelos

a la dirección de laminación,

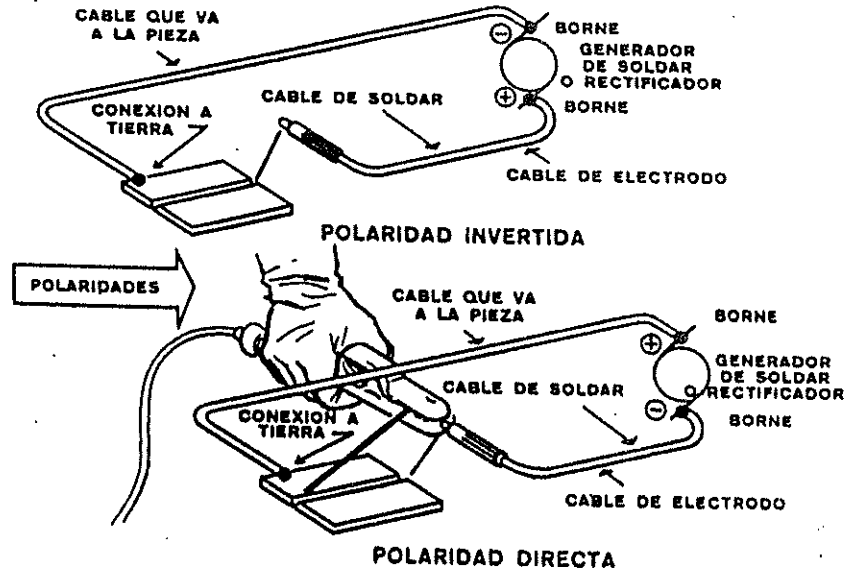
6. FISURAS EN LA GARGANTA Y FISURAS EN LA RAIZ:  
para evitar este tipo de fallas se necesita variar la técnica de soldadura o cambiar el material que se está utilizando, por no ser compatible.
  
7. FISURAS EN EL MARGEN Y FISURAS BAJO EL CORDON: debidas a fisuración en frío, ocurren un cierto tiempo después de la ejecución de la soldadura y, por lo tanto, pueden no ser detectadas en una inspección realizada inmediatamente de la operación de soldadura. Como ejemplo de fuentes de hidrógeno que contribuyen al apareamiento de ese tipo de fisuras, se pueden citar: elevada humedad del aire, electrodos húmedos, superficies sucias, etc.

#### CONDICIONES FISICAS, AMBIENTALES Y DE PROTECCION INDIVIDUAL ADECUADAS A LA SOLDADURA

La soldadura no debe ser ejecutada bajo la lluvia y viento, a no ser que la parte a soldar esté adecuadamente protegida.

El arco eléctrico emite radiaciones ultravioleta visibles y gases nocivos; por este motivo, el soldador debe estar protegido, utilizando filtros, lentes, ropas de protección, vidrio de seguridad; y, además, la operación debe realizarse en locales con ventilación adecuada.

## Soldadura con electrodo revestido (Shielded metal arc welding).



|   |   |
|---|---|
| <p>TIPO DE OPERACION:</p> <p>- manual</p>   | <p>EQUIPO: generador transformador rectificador</p>   |
| <p>CARACTERISTICAS:</p> <p>TASA DE DEPOSICION: 1 a 5 kg/h</p> <p>ESPEORES SOLDADOS: <math>\geq 2</math> mm</p> <p>POSICIONES: todas dependiendo del revestimiento</p> <p>TIPOS DE JUNTAS: todas</p> <p>DILUCION: de 10 a 30%</p> <p>RANGO DE CORRIENTE: 75 a 300 A.</p> | <p>CONSUMIBLES:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- electrodo de 1 a 6 mm de diámetro;</li> <li>- revestimientos de 1 a 5 mm de espesor.</li> </ul>  |
| <p>APLICACIONES TIPICAS EN LA INDUSTRIA</p> <p>Suelda la mayoría de los metales y aleaciones empleadas en la industria tales como tuberías, revestimientos, etc</p>   |   |
| <p>VENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- bajo costo,</li> <li>- versatilidad,</li> <li>- operación en locales de difícil acceso</li> </ul>   | <p>LIMITACIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- lento, debido a la baja tasa de deposición y necesidad de remoción de escoria;</li> <li>- requiere habilidad manual del soldador</li> </ul> |
| <p>PRECAUCIONES</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- El arco eléctrico emite radiaciones visibles y ultravioleta.</li> <li>- Riesgo de toques eléctricos, quemaduras y salpicaduras.</li> <li>- Emisión de gases.</li> </ul>                                    |   |

### 3.2.2 Soldadura con Arco de Tungsteno Gas Inerte -TIG-, (Gas Tungsteno Arc Welding-GTAW)

#### FUNDAMENTOS DEL PROCESO

Se conoce como soldadura TIG a la unión de metales por el calentamiento de éstos, con un arco que se forma entre el electrodo de Tungsteno no consumible y la pieza.

La protección, durante la soldadura, se consigue con un gas inerte o una mezcla de gases inertes, que también tiene la función de transmitir la corriente eléctrica cuando son ionizados durante el proceso. Cuando se hace con metal de aporte, éste no es transferido a través del arco, pero es fundido por el arco. El electrodo que conduce la corriente es un alambre de Tungsteno puro o aleación de este material.

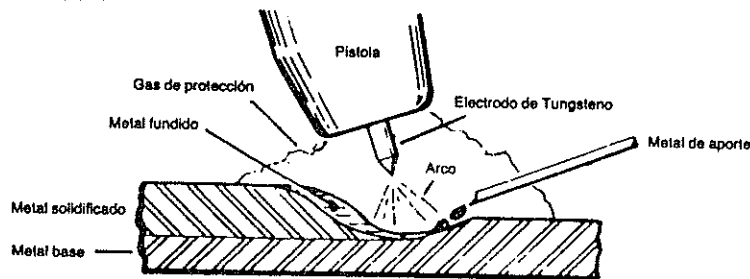


Fig. 29: Proceso de soldadura con gas inerte

El área del arco es protegida de la contaminación atmosférica por el gas protector, el cual fluye a través de la punta de la pistola. El gas remueve el aire, eliminando el nitrógeno, oxígeno e hidrógeno al contacto con el metal fundido y con el electrodo de tungsteno calentado. Hay poca o ninguna salpicadura y humo. La capa de soldadura es suave y uniforme, por lo que requiere poco o ningún acabado posterior.

La soldadura TIG puede usarse para ejecutar soldaduras de alta calidad en la mayoría de los metales y aleaciones. No hay ninguna escoria y el proceso puede usarse en todas las posiciones. Este proceso es el más lento de los procesos manuales.

#### EQUIPO DE SOLDADURA

La soldadura TIG es, usualmente, un proceso manual; pero puede ser mecanizado y automatizado.

El equipo necesario es:

- 1) un portaelectrodo con paso de gas y una punta para guiar el gas protector alrededor del arco, con un mecanismo de agarre para energizar y sostener un electrodo de tungsteno. Todo este mecanismo es llamado Pistola para Soldadura TIG;
- 2) un alimentador de gas protector;
- 3) un caudalímetro con regulador;
- 4) una fuente de energía;
- 5) un alimentador de agua de refrigeración; si la pistola fuera refrigerada con agua.

Las variables que más afectan este proceso son las variables eléctricas; tales como la tensión, corriente y características de la fuente de energía. Estas afectan la cantidad, la distribución y el control de calor producido por el arco y en la remoción del óxido refractorio de la superficie de algunos metales.

Los electrodos de tungsteno usados para la soldadura TIG son de varias clasificaciones y los

requisitos de éstos los da la norma AWS A5.12, de los cuales existen:

- 1) tungsteno puro (EWP)
- 2) tungsteno con 1.0 a 2.0% de torio. (EWTh-1, EWTh-2)
- 3) tungsteno con 0.15 a 0.4% de zirconio (EWZr)
- 4) electrodo de tungsteno con una tira íntegra longitudinal de tungsteno con 2% de torio, en toda su extensión (EWTh-3)

La adición de torio y zirconio al tungsteno permite a éste emitir electrones más fácilmente cuando es calentado.

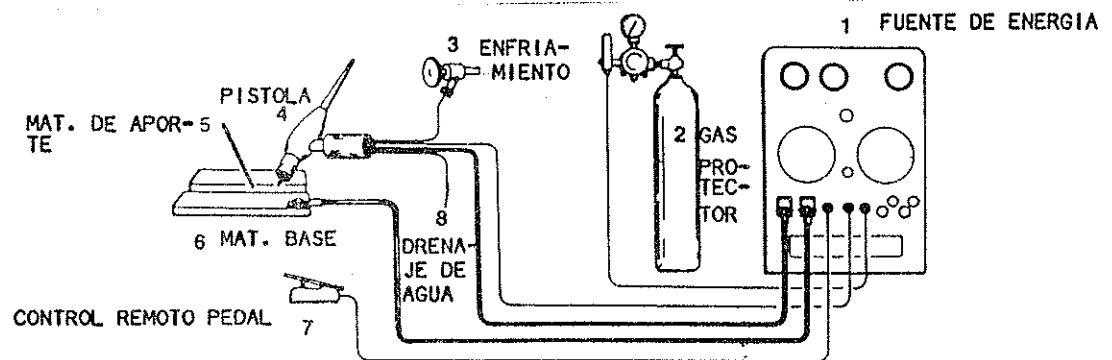


Fig. No. 30: Equipo de soldadura TIG

TIPOS Y FUNCIONES DE LOS METALES DE ADICION Y GASES QUE SE CONSUMEN EN EL PROCESO.

Una amplia variedad de metales y aleaciones están disponibles para su utilización como metales de aporte en el proceso de soldadura TIG.

Los metales de aporte, si fueran utilizados normalmente, son similares al metal que está siendo soldado.

Los gases de protección más comúnmente utilizados para la soldadura TIG son: argón, helio o una mezcla de éstos dos. El argón es muchas veces preferido con relación al helio, dado que presenta varias ventajas, entre las cuales están:

- 1) acción del arco más suave y sin turbulencias;
- 2) menor tensión en el arco para una corriente dada y largo de arco;
- 3) mejor acción de limpieza en la soldadura de materiales, como el aluminio y el magnesio, en la corriente alterna;
- 4) menos costo y mayor disponibilidad;
- 5) menor flujo de gas para una buena protección;
- 6) mejor resistencia a las corrientes de aire transversal;
- 7) más fácil la iniciación del arco.

Por otro lado, el helio utilizado como gas protector resulta en tensión de arco y corriente más alta para un mismo largo de arco, con relación al argón; produciendo más calor y, así, es más efectivo para soldadura de materiales gruesos (especialmente metales de alta conductividad, como el aluminio). Entre tanto, dado que la densidad del helio es menor que la del argón, usualmente se necesitan mayores caudales de gas para obtener un buen arco y una protección adecuada de la poza de fusión o metal fundido.



## CARACTERISTICAS Y APLICACIONES DE LA SOLDADURA

La soldadura TIG es un proceso bastante adecuado para espesores finos, dado el excelente control de la fuente de calor. La fuente de calor y el metal de aporte son controlados separadamente. El proceso puede ser aplicado en puntos que no necesitan metal de aporte.

Este proceso puede unir, también, paredes espesas de chapas y tubos de acero y de aleaciones metálicas. Se usa, tanto para soldar metales ferrosos y no ferrosos; materiales de acero al carbono y acero inoxidable, especialmente aquellos de aplicaciones críticas, frecuentemente soldadas por el proceso TIG.

Aunque la soldadura TIG tenga un alto costo inicial y baja productividad, éstos son compensados por la posibilidad de soldar muchos tipos de metales, espesores y en posiciones no posibles por otros procesos, asimismo, por la obtención de soldaduras de alta calidad y resistencia.

La soldadura TIG permite soldar, de una manera rápida, aluminio, magnesio, titanio, cobre y aceros inoxidables; así como, también, metales de soldaduras difíciles y otros de soldadura relativamente fácil como los aceros al carbono.

Algunos metales pueden ser soldados en todas las posiciones, dependiendo de la corriente de soldadura y de la habilidad del soldador.

La corriente usada en la soldadura TIG puede ser alterna o continua. Con la corriente continua se puede usar polaridad directa o inversa. Entre tanto, conociendo que la polaridad directa produce el mínimo de calentamiento en el metal base, electrodos menores pueden usarse, obteniéndose mayores

profundidades de penetración que las obtenidas con polaridad inversa o con corriente alterna.

Cuando se desea baja penetración, como en la soldadura de chapas finas de aluminio, se debe optar por la situación que lleve a un calentamiento mínimo del metal base. A pesar de las ventajas citadas, es conveniente recordar que la soldadura TIG requiere de una excepcional limpieza de las partes que serán soldadas y un entrenamiento extenso del soldador, para obtener un buen resultado.

Una consideración digna de tenerse en mente es el ángulo del cono de la punta del electrodo de tungsteno, pues, la conicidad afecta la penetración de la soldadura. Si el ángulo del cono se disminuye (punta más aguda) el ancho del cordón tiende a reducirse y la penetración aumenta. Además, si la punta se vuelve demasiado aguda, la densidad de corriente aumenta en la punta y, la extremidad de esta punta, puede alcanzar temperaturas superiores al punto de fusión del electrodo, desprendiéndose del mismo y pasando a formar parte de la poza de fusión, constituyéndose después de la solidificación en una inclusión de tungsteno en la soldadura.

El rango de espesor para la soldadura TIG (dependiendo del tipo de corriente, el tamaño del electrodo, el diámetro del alambre, el metal base y el gas escogido) va de 0.1 mm. a 5 mm. Cuando el espesor excede de 5 mm. se deben tomar algunas precauciones para controlar el aumento de temperatura en la soldadura de varias pasadas.

La tasa de deposición, dependiendo de los mismos factores mencionados para el espesor, puede variar de 0.2 a 1.3 Kg/hora.

## PREPARACION Y LIMPIEZA DEL AREA A SOLDAR

La preparación y limpieza del área a ser soldada con soldadura TIG requiere de todos los cuidados exigidos para la soldadura con electrodo revestido y, además, la limpieza del bisel y bordes debe dejar el metal brillante, en una faja de 10 mm. por los lados interno y externo.

Cuando se efectúa la aportación de la soldadura de raíz debe emplearse la protección, por medio de gas inerte, por el dorso de la pieza.

## DISCONTINUIDADES INDUCIDAS POR EL PROCESO

Sin tomar en cuenta la inclusión de escoria, la mayoría de las discontinuidades para otros procesos de soldadura puede ser encontrada en la soldadura TIG; al respecto, es importante saber que:

- a) FALTA DE FUSION: puede suceder, si se usa una técnica de soldadura inadecuada. La penetración del arco en la soldadura TIG es, relativamente, pequeña; por esta razón, para la soldadura TIG deben especificarse juntas adecuadas al proceso;
- b) INCLUSIONES DE TUNGSTENO: pueden resultar de un contacto accidental del electrodo de tungsteno con la poza de fusión; la extremidad caliente del electrodo de tungsteno puede fundirse, transformándose en una gota de tungsteno que se transfiere a la poza de fusión; produciendo, asimismo, una inclusión de tungsteno en la soldadura;

La aceptación o no de estas inclusiones, depende del código que rija el servicio que

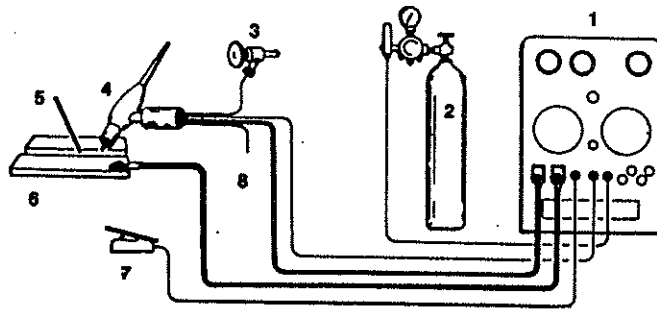
se está ejecutando;

- c) POROSIDAD: puede ocurrir debido a una inadecuada limpieza del bisel o a las impurezas del metal base;
  
- d) FISURAS: en la soldadura TIG, normalmente, se deben a fisuración en caliente. Las fisuras longitudinales ocurren en depósitos hechos a alta velocidad. Fisuras de cráteres, la mayoría de las veces, se deben a las corrientes de soldaduras impropias. Y las fisuras debidas al hidrógeno (fisuración en frío) cuando aparecen, se deben a la humedad en el gas inerte.

#### CONDICIONES DE PROTECCION INDIVIDUAL

En la soldadura TIG, la cantidad de radiación ultravioleta liberada es bastante grande. Partes de la piel, directamente expuestas a tales radiaciones, se queman rápidamente; lo cual exige tomar precauciones. La protección de la vista es fundamental. Otro aspecto de esas radiaciones, es la capacidad de descomponer solventes, con la liberación de gases bastante tóxicos. Por eso, en ambientes cerrados, se debe cuidar que no haya solventes en las inmediaciones.

## Soldadura TIG (Gas Tungsteno Arc Welding - GTAW)



1. fuente de energía
2. gas de protección
3. suministro de agua
4. pistola
5. material de aporte
6. material base
7. control remoto de pedal
8. drenaje de agua

|   |  |
|---|--|
| TIPO OPERACION: manual o automático   | EQUIPOS: rectificador, generador, transformador, pistola.  |
| COSTO DE EQUIPO: 1  | Cilindros de gas y equipos de movimiento automático.   |
| <b>CARACTERISTICAS</b><br>TASA DE DEPOSICION: 0.2 a 1.3 Kg/h<br>ESPESORES SOLDADOS: 0.1 a 50 mm<br>POSICIONES: todas<br>TIPOS DE JUNTAS: todas<br>DILUCION:<br>con mat. de adición =2 a 20%<br>sin mat. de adición =100%<br>RANGO DE CORRIENTE: 10 a 400 A. | <b>CONSUMIBLES</b><br><br>Varillas y,<br><br>Gases   |
| <b>APLICACIONES TIPICAS EN LA INDUSTRIA</b><br>-Soldaduras en materiales como el aluminio, titanio, aleaciones de níquel, etc.  |  |
| <b>VENTAJAS</b><br>- Se producen soldaduras de mejor calidad.   | <b>LIMITACIONES</b><br>- Baja tasa de deposición.<br>- Requiere de soldadores muy bien entrenados. |
| <b>PRECAUSTIONES:</b><br>- Emite radiacion ultravioleta intensa.  |  |

### 3.2.3 Soldadura MIG-MAG (Gas Metal Arc Welding -GMAW-)

#### FUNDAMENTOS DEL PROCESO

La soldadura MIG/MAG usa el calor de un arco eléctrico, entre un electrodo desnudo alimentado de manera continua y el metal base. El calor funde el final del electrodo y la superficie del metal base para formar la soldadura. La protección del arco y de la poza de la soldadura fundida viene, enteramente, de un gas alimentado externamente; el cual puede ser inerte, activo o una mezcla de estos. Por lo tanto, dependiendo del gas, se tienen los siguientes procesos.

3.2.3.1 PROCESO MIG (Metal Gas Inerte): inyección de gas inerte.

El gas puede ser:

argón,

helio,

argón + 1% de O<sub>2</sub>,

argón + 3% de O<sub>2</sub>.

3.2.3.2 PROCESO MAG (Metal Activo Gas): inyección de gas activo o mezcla de gases que pierden la característica de inertes cuando parte del metal base es oxidado.

Los gases utilizados son:

CO<sub>2</sub>,

CO<sub>2</sub> + 5 a 10% DE O<sub>2</sub>,

argón + 15 a 30% de CO<sub>2</sub>,

argón + 5 a 15% de O<sub>2</sub>,

argón + 25 a 30% de O<sub>2</sub>.

Las escorias que aparecen en los procesos de soldadura con electrodo revestido y soldadura al arco sumerso, no se forman en el proceso de soldadura MIG/MAG. Una película vítrea (que tiene aspecto de vidrio) de sílica se formará de los electrodos de alto silicio, el cual debe ser

tratado como escoria.

La soldadura MIG/MAG es un proceso bastante versátil. Sus mayores ventajas son:

1. tasa de deposición mayor que la de soldadura con electrodos revestidos;
2. menos gas y humo en la soldadura;
3. alta versatilidad;
4. amplia capacidad de aplicación;
5. soldadura para varios espesores y materiales.

La soldadura MIG/MAG puede ser automática o semi-automática. En el proceso semi-automático, el electrodo es alimentado, automáticamente, a través de la pistola; el soldador controla la inclinación y la distancia de la pistola a la pieza, así como la velocidad de avance y la manipulación del arco.

La soldadura MIG/MAG puede usarse, también, para aplicaciones de revestimiento superficial.

#### EQUIPO DE SOLDADURA

El equipo de soldadura MIG/MAG consiste en una pistola de soldadura, una fuente de energía, una fuente de gas protector y un sistema de accionamiento de alambre.

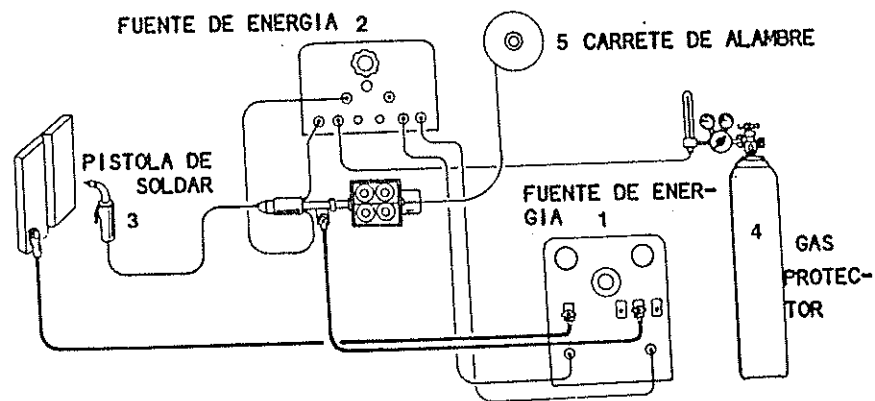


Fig. 31: Equipo de soldadura MIG/MAG

La pistola tiene un tubo de contacto para transmitir la corriente de soldadura para el electrodo y una boquilla para dirigir el gas protector. El alimentador de alambre se compone de un pequeño motor de corriente continua y una rueda motriz.

La alimentación de gas protector es regulada por el caudalímetro y regulador de presión. Estos posibilitan la alimentación constante de gas para la boquilla de la pistola.

La mayoría de las aplicaciones de la soldadura MIG/MAG requieren energía con corriente continua y polarización inversa. En esta situación se tiene un arco más estable, transferencia estable, bajas salpicaduras y cordón de soldadura de buenas características. Corriente continua, polaridad directa, se usa con poca frecuencia; la corriente alterna nunca se utiliza para este proceso.

#### PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE METAL

Existen cuatro modos mediante los cuales el proceso de soldadura MIG/MAG puede depositar material en una pieza:

1. POR TRANSFERENCIA GLOBULAR: ocurre debido a la corriente baja, en relación al tamaño del electrodo. El metal se transfiere del electrodo para la pieza como glóbulos; cada uno mayor en diámetro que el electrodo. Los glóbulos se transfieren para la poza sin mucha dirección y el apareamiento de salpicaduras es evidente;
2. POR TRANSFERENCIA, POR SPRAY O POR PULVERIZACIÓN AXIAL: ocurre con corrientes al-



tas. El metal de aporte fundido se transfiere a través del arco, como gotitas finas;

3. TRANSFERENCIA POR CORTO CIRCUITO: puede requerir una fuente de energía especial. La fusión se inicia globularmente y la gota va aumentando de tamaño hasta tocar la poza de fusión, produciendo un corto circuito y extinguiendo el arco. Sobre la acción de determinada fuerza, la gota es transferida para la pieza. Este proceso permite soldadura en todas las posiciones y es un proceso de energía relativamente bajo, por lo que se restringe su uso para espesores mayores;
4. SOLDADURA AL ARCO PULSANTE: mantiene un arco de corriente baja como elemento de fundición e inyecta, sobre esa corriente baja, pulsos de alta corriente. La transferencia de metal de aplicación se produce por el chorro de gotitas durante esos pulsos. Esta característica de corriente hace que la energía de soldadura sea menor, lo cual torna posible la soldadura en la posición vertical, por el uso de alambres de diámetro grande.

La mayoría de la soldadura MIG/MAG por spray se hace en la posición plana. Las soldaduras MIG/MAG por arco eléctrico pulsante y por transferencia de corto circuito son adecuadas para soldaduras en todas las posiciones. Cuando la soldadura se hace en la posición sobre cabeza, se utilizan electrodos de diámetros pequeños; con método de transferencia por corto circuito.

En la transferencia por spray puede usarse la corriente continua pulsada.

## TIPOS Y FUNCIONES DE LOS CONSUMIBLES (GASES Y ELECTRODOS)

La finalidad principal del gas protector, en la soldadura MIG/MAG, es proteger la soldadura de la contaminación atmosférica. El gas protector también influye en el tipo de transferencia, en la profundidad y en la formación del cordón.

El argón y el helio son gases de protección usados para la soldadura de la mayoría de los metales no ferrosos; el CO<sub>2</sub> se utiliza, frecuentemente, para la soldadura de aceros dulces. Cuando se hace la selección de un gas protector, el factor más importante que debe tenerse en mente es que mientras más denso sea el gas, más eficiente será la protección del arco.

Los electrodos para soldadura MIG/MAG son similares o idénticos, en su composición, a los electrodos de otros procesos de soldadura que utilizan electrodos desnudos. Para el caso específico de la soldadura MAG, contienen elementos desoxidantes, tales como silicio y manganeso, en porcentajes determinados.

Como una regla, las composiciones del electrodo y del metal base deben ser similares, lo más que sea posible. Específicamente, para el proceso MAG, debe tomarse en cuenta el aumento de elementos desoxidantes. Para mayor información acerca de los electrodos, deben consultarse las especificaciones AWS.

## COMPORTAMIENTO DE LA ATMOSFERA ACTIVA EN EL PROCESO MAG

Por atmósfera activa se entiende la inyección de gas de protección activo; esto es, con

capacidad de oxidar el metal durante la soldadura. Para facilitar el rozamiento sobre los fenómenos envueltos, se tomará como ejemplo la inyección de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

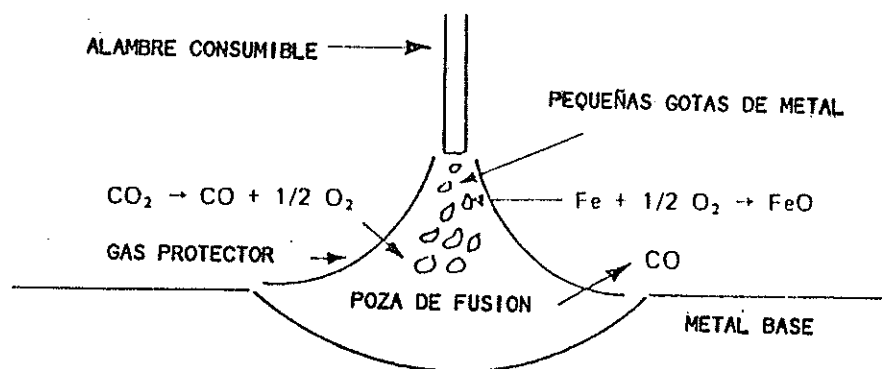


Fig. 32: Inyección del gas activo.

El dióxido de carbono inyectado en el gas de protección, al dividirse en monóxido de carbono y oxígeno ( $CO_2 \rightarrow CO + 1/2 O_2$ ) propicia la formación de monóxido de hierro:  $Fe + 1/2 O_2 \rightarrow FeO$ . El monóxido de hierro (FeO), a su vez, se difunde y se disuelve en la poza de fusión mediante la reacción:  $FeO + C \rightarrow + CO$ .

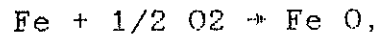
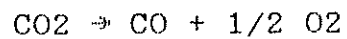
Puede ocurrir que no haya tiempo para la salida del monóxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de la poza de fusión, lo que provocará poros o porosidades en el metal de la soldadura. El problema se resuelve mediante la adición de elementos desoxidantes, tales como el manganeso.

El manganeso reacciona como el óxido de hierro, dando origen al óxido de manganeso; el cual, al no ser un gas, va para la escoria ( $FeO + Mn \rightarrow Fe + MnO$ ).

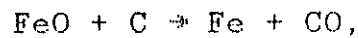
El manganeso puro debe adicionarse, en cantidades compartidas, al FeO formado. El exceso de manganeso provocará que parte de él se incorpore a la soldadura, implicando mayor dureza

de la zona fundida por la soldadura y, por tanto, mayor probabilidad de ocurrencia de fisuras. En síntesis, ocurren las reacciones siguientes:

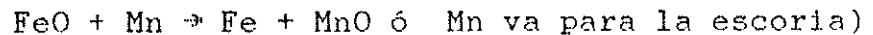
a) en la atmósfera activa:



b) cuando se da la transformación líquida/sólida:



c) con la adición de elementos desoxidantes:



(Proceso MAG y todos los otros, con atmósfera activa)

A medida que la velocidad de solidificación aumenta, se vuelve mayor la probabilidad de que aparezcan poros y porosidades. La oxidación puede ser a causa de poros y porosidades. La desoxidación en exceso aumentará la resistencia mecánica a la tracción de la soldadura, por lo que aumentará su templabilidad. El riesgo de ocurrencia de fisuras será mayor. En la soldadura MAG el elemento desoxidante se adiciona mediante el uso de un alambre especial, que contenga mayor cantidad de elemento desoxidante. Además de Mn, son, también, elementos desoxidantes el Si, V y Ti.

#### CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES DE LA SOLDADURA

La soldadura MIG/MAG produce soldaduras de alta calidad con procedimientos de soldadura, apropiados. Como no se utiliza un flujo, la posibilidad de inclusión de escoria es semejante al proceso de electrodo revestido o arco sumergido, es mínima; pudiendo, por otro lado, ocurrir la

inclusión de una escoria vítrea, característica del proceso si la limpieza entre cada pasada no se hace de manera adecuada. El hidrógeno, en la soldadura es, prácticamente, inexistente.

La soldadura MIG/MAG es un proceso de soldadura para todas las posiciones, dependiendo del electrodo y del gas o gases usados. Puede soldar la mayoría de los metales y ser utilizado, inclusive, para la deposición de revestimientos superficiales. Tiene capacidad para soldar espesores mayores de 0.5 mm., por transferencia por corto circuito. La tasa de deposición puede llegar a 15 Kg/h, dependiendo del electrodo, del modo de transferencia, de los gases o gas usado.

#### DISCONTINUIDADES INDUCIDAS POR EL PROCESO

En la soldadura MIG/MAG pueden ocurrir las siguientes discontinuidades:

1. FALTA DE FUSION: puede suceder en la soldadura MIG/MAG, con la transferencia por corto circuito. Ocurre, también, con transferencia por spray o pulverización axial cuando se utilizan bajas corrientes;
2. INCLUSIONES DE ESCORIA: el oxígeno contenido en el propio metal base o aquel captado durante la soldadura, bajo condiciones deficientes de protección, formando óxidos en la poza de fusión.

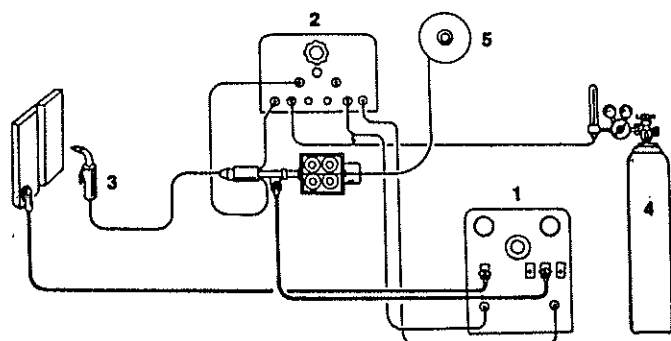
La mayoría de las veces, esos óxidos fluctúan en la poza de fusión; pero, ellos pueden quedar aprisionados bajo el metal de la soldadura, dando origen a la inclusión de escoria.

3. DOBLADURAS, LAMINACIONES DOBLES Y FISURA INTERLAMINAR: puede suceder o surgir en soldaduras con alto grado de restricción;
4. MORDEDURAS: cuando acontecen, se derivan de la poca habilidad del soldador;
5. POROS Y POROSIDADES: como se indicó anteriormente, los poros y porosidades son provocados por la mezcla del gas con la soldadura. En la soldadura MIG/MAG se produce el siguiente proceso: el gas de protección, inyectado sin tomar en cuenta determinados requisitos técnicos, puede mover la atmósfera que lo envuelve, la cual contiene oxígeno y nitrógeno; éstos pueden disolverse en la poza de fusión, dando origen a los poros y porosidades del metal base;
6. FISURAS: pueden producirse fisuras, en soldaduras con técnicas deficientes, como por ejemplo: el uso de metal de aporte inadecuado.

#### CONDICIONES DE PROTECCION INDIVIDUAL

En la soldadura MIG/MAG, es muy grande la emisión de radiación ultravioleta. Se presenta, además, el problema de proyecciones metálicas. Por estas y otras causas más, el soldador debe usar los equipos convencionales de seguridad, es decir, guantes, lentes para protección de la vista, etc. En áreas encerradas no se debe olvidar la necesidad de una ventilación forzada; así como el retiro de recipientes conteniendo solventes que se descompongan en gases tóxicos por la acción de los rayos ultravioleta.

## Soldadura MIG/MAG (gas metal arc welding -GMAW).



1. máquina soldadora
2. alimentador que controla el avance del alambre
3. pistola de soldar
4. gas protector
5. carrete de alambre

|  |   |
|--|---|
| <p>TIPO DE OPERACION:<br/>automático o semi-automático</p>   | <p>EQUIPO: rectificador, generador, pistola, cil. de gas, unidad de alimentación de alambre, unidad aut.</p>                    |
| <p>CARACTERISTICAS:<br/>TASA DE DEPOSICION: 1 a 15 kg/h<br/>ESPEORES SOLDADOS: <math>\geq 0.5</math> mm.<br/>POSICIONES: todas</p> <p>TIPOS DE JUNTAS: todas<br/>DILUCION: de 10 a 30%<br/>RANGO DE CORRIENTE: 60 a 500 A.</p> | <p>CONSUMIBLES:<br/>- alambre: 0.5 a 1.6 mm.<br/>gases: argón<br/>helio<br/>CO<sub>2</sub><br/>mezcla de A + CO<sub>2</sub></p> |
| <p>APLICACIONES TIPICAS EN LA INDUSTRIA</p> <p>Suelda la mayoría de los metales y aleaciones empleadas en la industria tales como tuberías, revestimientos, etc</p>  |   |
| <p>VENTAJAS<br/>- Alta tasa de deposición</p>  | <p>LIMITACIONES<br/>- Requiere de soldadores muy bien entrenados.</p>   |
| <p>PRECAUCIONES<br/>- Gran emisión de radiación ultravioleta y proyecciones metálicas</p>  |   |





## TRABAJOS REALIZADOS PARA LA RECUPERACION DE LOS CANGILONES

### TRABAJOS DE SOLDADURA

En los trabajos de soldadura se deben seguir ciertos procedimientos específicos para obtener resultados satisfactorios; de lo contrario, dichos trabajos serán afectados por fallas indeseables, las cuales pueden percibirse de inmediato, algunas veces y, durante la operación de la máquina, generalmente.

Las fallas más comunes son las fisuras por concentración de tensiones; en algunos casos las soldaduras se aplican al aire libre y sin ningún control de temperaturas; lo que, al final, puede representar la pérdida del cangilón.

#### 4.1 METALURGIA DE LA SOLDADURA

En el estudio del comportamiento de los metales se ha podido comprobar que la forma de enfriamiento de un metal permite obtener propiedades diferentes de dicho metal.

El tipo de estructura cristalina que predomina en un metal define, básicamente, las propiedades de éste.

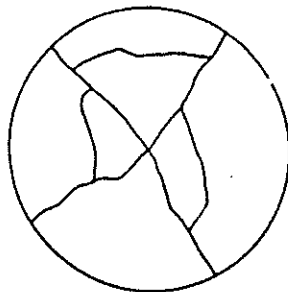


Fig. 33:  
Austenita

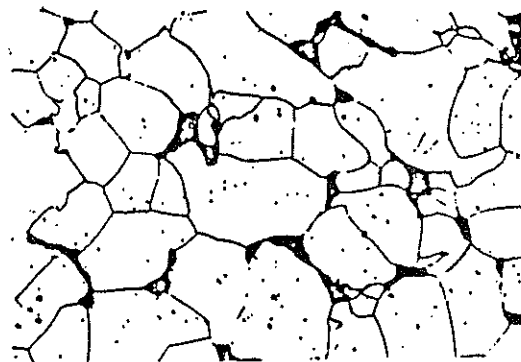


Fig. 34:  
Perlita

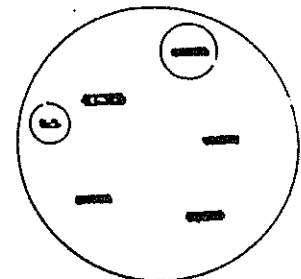


Fig. 35:  
Ferrita

Cuando se trata de la solidificación de un metal puro se presenta una temperatura definida de cambio, conservándose, ésta, mientras dura la solidificación de todo el metal.

Cuando se trata de una aleación cuyos metales sean solubles en estado líquido y en estado sólido, la solidificación no tiene lugar a temperatura constante.

En el cambio del estado líquido al estado sólido aparecen los cristales, cuyo tipo, tamaño y estructura juegan un rol esencial en las propiedades del metal o aleación.

En el cambio de estado se observa la aparición de núcleos o gérmenes de cristalización y cabe distinguir en el proceso:

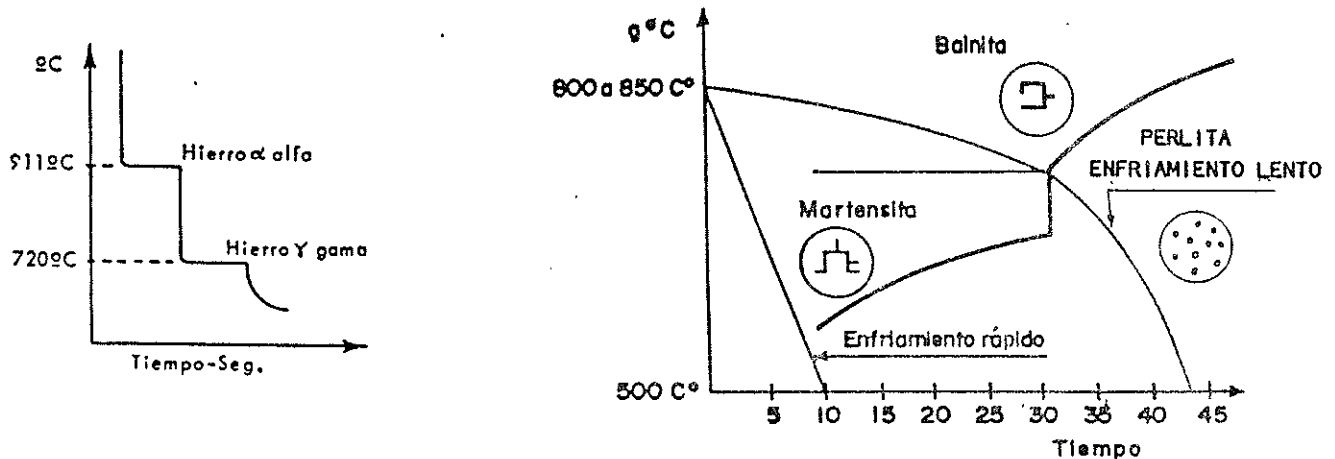


Fig. 36: Curvas de enfriamiento

$V_g$  = La velocidad de germinación, que es la velocidad con la cual van apareciendo nuevos gérmenes.

$V_c$  = La velocidad de crecimiento, que es la velocidad con la que los gérmenes crecen.

Estas dos velocidades se ven influidas y controladas con la temperatura, obteniéndose materiales de grano fino, cuando la velocidad de germinación es muy grande; y, materiales de grano grueso, cuando la velocidad de crecimiento es muy grande.

**GRANO:** se llama grano a la agrupación de cristales que se ven a simple vista y presentan unos bordes definidos.

**PUNTOS CRITICOS:** se llaman puntos críticos a las temperaturas en las cuales tienen lugar las transformaciones de estructuras en estado sólido.

Los puntos críticos, en los aceros, dependen de la proporción de carbono y otros metales presentes en la aleación. Además, cambian su estructura y, al mismo tiempo, su clase de componente, básicamente, por:

1. el porcentaje de carbono que contengan;
2. el grado de calor que se les aplique y la rapidez de su enfriamiento.

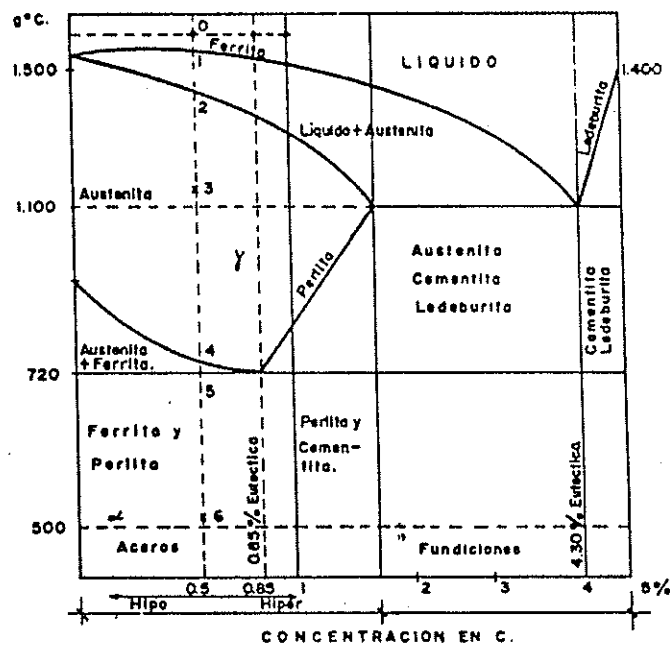


Fig. 37: Diagrama de Hierro-Carbono

A título, puramente informativo, pueden observarse en la figura anterior algunos de los componentes que existen en una aleación hierro-carbono, en función del contenido de carbono y de la temperatura, en el supuesto de un enfriamiento teóricamente muy lento.

FUSION: la fusión del metal es el desmoronamiento de la red cristalina del mismo.

El enfriamiento permitirá o provocará que los cristales adopten características y orientaciones particulares que pueden ser o no deseables.

UNION SOLDADA: en la unión soldada de un metal se pueden distinguir dos partes bien definidas:

1. la zona fundida, constituida por el aporte y la región adyacente;
2. el metal base.

Dentro de la zona fundida se distinguen:

- a) la zona fundida, propiamente dicha;
- b) una zona de transición.

La zona fundida está sujeta a un cierto número de fenómenos, que son:

- a) modificaciones químicas;
- b) absorción de gases;
- c) precipitación de compuestos definidos de la solución madre;
- d) transformaciones eutécticas;
- e) modificaciones estructurales.

Las modificaciones químicas pueden tener influencia favorable o desfavorable, según el tipo. Generalmente, se producen pérdidas por oxidación de elementos perniciosos o útiles, incorporados con los revestimientos provistos para soldar.

La absorción de gases por el material fundido puede tener lugar con el oxígeno, el nitrógeno y el hidrógeno.

El tipo de procedimiento de soldadura, tipo de

revestimiento, condición del mismo, tipo de acero, longitud del arco y otros factores determinan estos procesos.

Secar correctamente los electrodos, por un período prolongado a unos  $250^{\circ}\text{C}$ , desciende, significativamente, el nivel de absorción de hidrógeno.

La precipitación de compuestos tiene lugar cuando sale un compuesto de la solución; por ejemplo, la precipitación del carburo de cromo en el soldado de ciertos aceros inoxidables.

Las modificaciones estructurales afectan la estructura interna, el grano, su forma, su tamaño, su orientación y los constituyentes de la estructura, según el ciclo térmico impuesto por la soldadura.

**METAL BASE:** el metal base sufre un tratamiento térmico variable en cada punto y produce modificaciones de tipo estructural, provocando un aumento de tamaño de los granos, hasta cierta distancia.

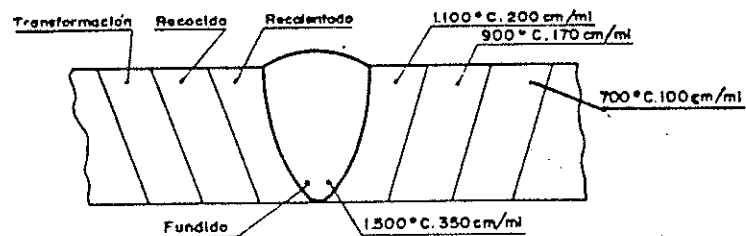


Fig. 38: Transformación del metal base durante la soldadura.

#### 4.2 PROCEDIMIENTO DE PRECALENTAMIENTO

Para obtener reparaciones libres de fisuras en el acero al 13/4 Cr/Ni, es necesario un precalentamiento en el área a soldar; el propósito es tener el material base arriba de la temperatura martensítica de transformación (cerca de 200°C) durante la soldadura. La temperatura de precalentamiento depende, en primera instancia, del tipo, la superficie y la posición del defecto. Defectos pequeños, tales como porosidades e inclusiones, los cuales se presentan después de cierto tiempo de operación de la turbina, en áreas de baja tensión mecánica, pueden ser soldados sin más precaución que un precalentamiento a una temperatura de 150°C a 200°C. Estos defectos son reparados con pequeños depósitos de material. Su propósito es recuperar el perfil liso del cangilón, para que el flujo de agua corra sin interrupción y evitar, más tarde, grandes agujeros por cavitación. Para este caso, no es necesario un alivio de tensiones.

Cuando se efectúan reparaciones en áreas altamente tensionadas de la rueda Pelton se deben tomar en cuenta las fisuras por fatiga, daños por los sólidos, posible erosión y cavitación en el cangilón y aristas. En estos casos, la temperatura de precalentamiento debe ser aumentada de 200°C a 300°C, de manera que se pueda reducir la tendencia de fisuras por soldadura. En este caso, se recomienda un alivio de tensiones después de la reparación.

La temperatura de precalentamiento requerida y su necesidad se definen con base en relaciones experimentales con el tipo de material, el espesor y la forma de la pieza.

La zona de precalentamiento debe extenderse, por lo menos, a unos 100 mm. a partir de los bordes a soldar. El calentamiento debe ser uniforme. Deben evitarse los puntos de calor elevado.

Durante las reparaciones en el taller de fundición de la fábrica, es necesario utilizar equipos de calentamiento por

inducción; de este modo puede llevarse la turbina completa a la misma temperatura y mantenerla por períodos largos.

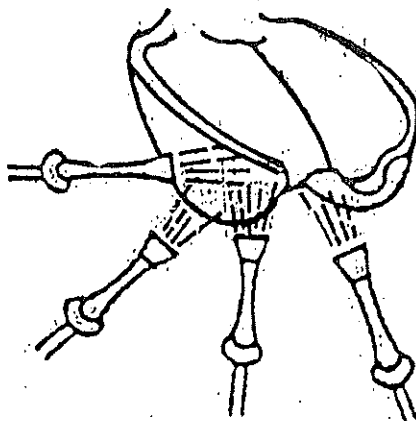


Fig. 39: Precalentamiento correcto con antorcha

En las Centrales Hidroeléctricas, donde no se cuenta con los equipos anteriormente mencionados, será necesario utilizar generadores de calor, alimentados con gas propano o butano. Por este método es posible precalentar localmente el área a reparar y sus alrededores y, en caso necesario, aliviar las tensiones de la soldadura. También puede usarse el soplete de oxiacetileno para el precalentamiento; pero, la antorcha de gas propano, que es liviana y ajustable, es la más adecuada, ya que con ella se logra evitar más fácilmente el sobre-calentamiento local.

En el procedimiento se definen los lineamientos necesarios para el precalentamiento.

- |  |  |
|--|--|
| 1. Material del rodete:                        | Cr/Ni, 13/4  |
| 2. Espesor:                                    | 300 mm.  |
| 3. Temperatura de precalentamiento:            | 150°C a 200°C (Rep. menores) y de 200°C a 300 (Rep. Mayores) |
| 4. Ascenso libre hasta:                        | 100°C  |
| 5. Velocidad de ascenso, calentamiento máximo: | 55°C/hora  |
| 6. Sostenimiento de temperatura:               | Durante la soldadura   |
| 7. Método de precalentamiento:                 | Multiflama o antorcha  |

8. Control de temperatura: Tizas, termo colores o parámetros

#### 4.3 PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

La práctica moderna ha llevado a la estandarización de la soldadura. Dada la marcada intervención de factores humanos y técnicos en los resultados de una soldadura, se ha llegado a especificar, con detalle, los aspectos esenciales que intervienen en una soldadura determinada, creando los llamados procedimientos de soldadura.

El procedimiento de soldadura se realiza utilizando los parámetros y valores establecidos para su ejecución. En la práctica industrial, para la ejecución de reparaciones mayores, es requisito indispensable cumplir con las actividades previas.

La calificación del procedimiento de soldadura, con el cual se hacen todos los ensayos y comprobaciones necesarias para cerciorarse de la calidad del procedimiento.

La calificación del soldador se determina después de una adecuada práctica, mostrando la habilidad necesaria para ejecutar soldaduras de calidad con el procedimiento establecido.

Desde un punto de vista práctico, es conveniente atenerse al procedimiento de soldadura especificado para ejecutar los trabajos.

Convencionalmente se pueden clasificar las soldaduras de reparación del rodete de la siguiente forma:

##### SOLDADURAS MENORES

Se consideran soldaduras menores en el rodete aquellas que, encontrándose fuera de las zonas críticas de esfuerzos, requieren muy pocos milímetros de aporte.



## SOLDADURAS DE IMPORTANCIA

En forma convencional, se consideran como tales, aquellas que superen los 5 mm. de profundidad y se encuentren fuera de las zonas críticas de esfuerzos. Para el caso del rodete, requieren tratamiento térmico, el cual puede hacerse localmente.

## REPARACIONES MAYORES

Cuando afectan un gran volumen del rodete, en cuanto a cantidad de metal a aportar. Para ejecutarlas es indispensable el acondicionamiento del rodete en un lugar apropiado, con precalentamiento global y con tratamiento de alivio de tensiones, también global.

En el procedimiento de soldadura se definen los parámetros esenciales involucrados en la ejecución de la soldadura que se especifica. Este procedimiento, definido y probado, es el siguiente:

1. material del rodete: Cr/Ni 13/4
2. proceso de soldadura: SMAW-Arco eléctrico con electrodo revestido.
3. preparación de la zona a reparar: amolado, hasta que quede libre de defectos.
4. ensayo superficial: LP
5. precalentamiento: obligatorio
6. soldar: hasta rellenar completamente, dando una terminación con dos pasos más de sobre-monta (capas de revenido) de acuerdo a la Fig. 40; se permite cincelar entre cordones.
7. pulir la soldadura: utilizando discos abrasivos.
8. ensayo superficial: LP.

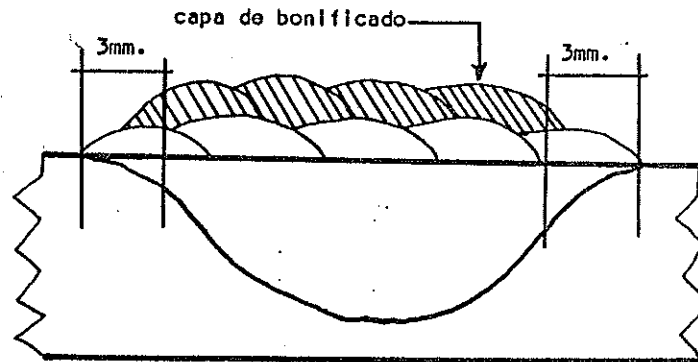


Fig. 40: Capas de revenido de soldadura

#### 4.4 TEMPERATURAS ENTRE PASOS

Para soldar materiales base al 13/4 Cr/Ni, o, composición similar, de cualquier espesor, la temperatura entre pasos debe ser de 180-210°C, manteniendo un arco corto.

#### 4.5 PROCESO DE ENFRIAMIENTO DE LA SOLDADURA

Es necesario, durante la soldadura y después de ésta, cubrir el cangilón con sacos o sábanas de asbesto, para propiciar un enfriamiento lento del cangilón precalentado; de lo contrario, se produciría un enfriamiento brusco, ocasionando fallas en la zona reparada.

Los sacos o sábanas de asbesto tienen otra función importante, la cual consiste en proteger al soldador de la radiación del calor, facilitando su trabajo.

#### 4.6 MATERIAL DE APORTE PARA LA SOLDADURA

Como material de aporte, para toda soldadura, debe seleccionarse aquel que posea una composición química igual o compatible con el material base, para obtener buenos resultados en la reparación.

El electrodo seleccionado para la reconstrucción de los rodetes Pelton, 13/4 Cr/Ni, de la Hidroeléctrica Aguacapa, es el siguiente:

UTP-6635: electrodo con bajo contenido de hidrógeno, para unir y revestir aceros inoxidables al Cr y aceros fundidos con un 13% Cr y un 4% Ni ó 13% Cr y 1% Ni.

El depósito es resistente a la oxidación y posee una elevada resistencia al desgaste por cavitación y erosión. Es muy apropiado para trabajos en ruedas de turbinas tipo Pelton, Francis y Kaplan.

#### CARACTERISTICAS DE LA SOLDADURA

Con este electrodo puede soldarse en todas las posiciones. La escoria se retira fácilmente y el depósito tiene poca tendencia a la fisuración. Rendimiento: alrededor de 150%; composición del depósito: C, Si, Mn, Cr, Ni, Mo.

#### PROPIEDADES MECANICAS DEL DEPOSITO

| RESISTENCIA A LA TRACCION<br>psi<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | AWS<br>DIN 8556 | ALARGAMIENTO<br>(l = 5d) -<br>% | TENACIDAD ISO v<br>pie/lb °F<br>(joule) (°C) |
|--|-----------------|---------------------------------|--|
| > 110,000<br>( > 800 )                                   | E 13 4 B 20     | > 13                            | > 36 68<br>( > 50 ) (20)                     |

Punto de identificación:

Neutral

Diámetro de electrodo utilizado:

1/8" (3.2 mm.)

#### 4.7 MANEJO DEL MATERIAL DE APORTE

Considerando que el UTP 6635 es un electrodo con fundente del tipo bajo en contenido de hidrógeno, es recomendable secarlo, en un horno de presecado, a una temperatura de 250 - 300°C durante 2 - 3 horas. A continuación debe trasladarse a un horno portátil, a una temperatura de 120 - 150°C. El electrodo debe usarse directamente del horno.

#### 4.8 CARACTERISTICAS ELECTRICAS

Corriente continua, polaridad directa (CC, +)

|            |               |           |           |
|------------|---------------|-----------|-----------|
| ELECTRODOS | DIAMETRO = mm | 3.2       | 4.0       |
|            | Pul           | 1/8       | 5/32      |
| Longitud   | mm            | 350       | 350       |
| Amperaje   | A             | 100 - 130 | 130 - 170 |

## C A P I T U L O V

**PROCESO DE AMOLADO Y PULIDO  
PARA DAR FORMA FINAL AL CANGILON****CONCEPTO**

Por amolado y pulido se entiende el trabajo de remoción de metal, actividad que se realiza en la superficie de los cangilones mediante el uso de piedras y materiales abrasivos.

Tal y como se ha indicado anteriormente, al tratar el tema de los defectos en el rodete, la calidad de la superficie juega un importante papel, tanto hidráulica como estructuralmente, en cuanto al comportamiento de los defectos superficiales.

El daño causado por un golpe o el desgaste por la erosión pueden complicarse e incrementarse con la aparición de cavitación por corrosión localizada.

Desde el punto de vista hidráulico, el perfil de las partes hidráulicas activas juegan un papel esencial. Con el desgaste y con los trabajos se va modificando el perfil de los cangilones.

Con el amolado y el pulido se persiguen, fundamentalmente, dos aspectos: a) un perfil adecuado y b) una buena terminación superficial.

Para la ejecución de los trabajos de amolado y pulido deben utilizarse los abrasivos que proporcionen mejores resultados. Para ello es preciso considerar tanto el acabado como el amolado, si es en frío o si calienta demasiado la superficie, así como otros aspectos prácticos de manejo.

**5.1 ABRASIVOS UTILIZADOS**

Los abrasivos más utilizados, para piedras de esmeril, son de dos tipos: Carborundum (carburo de silicio) y Aloxite (óxido de aluminio).

SELECCION DE DISCOS Y PIEDRAS ABRASIVAS

Esta depende de la dureza del material a desbastar. Para materiales duros como el acero, aceros inoxidables, hierro maleable, etc., se recomiendan los abrasivos de óxido de aluminio (Aloxite), puesto que este tipo de grano no tiende a achatarse fácilmente, dando mejores resultados para el desbaste de los mismos.

El carburo de silicio (Carborundum) se comporta mejor para el desbaste de hierro fundido, latón, bronce suave, aluminio, piedra y carburos cementados. La razón obedece a que el carburo de silicio se fractura más satisfactoriamente en relación con el achatado de sus granos y sus filos cortantes se remueven conforme se necesita.

Consecuentemente, se puede afirmar que, para desbastar materiales duros, se utilizan abrasivos de grano fino; los materiales suaves se desbastan con grano grueso.

La figura 41 presenta la carta para la selección de los distintos abrasivos.

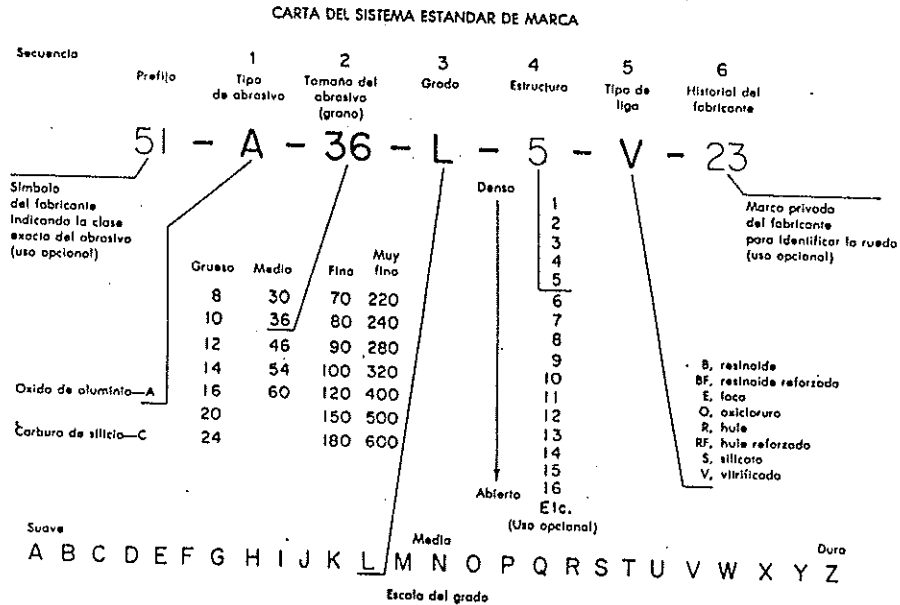


Fig. 41: Sistema estándar de marca para ruedas hechas de óxido de aluminio y carburo de silicio.

Los cilindros y discos de lija son llamados, también, abrasivos revestidos. Se hacen con granos abrasivos, adhesivo y respaldo; el adhesivo puede ser goma o resina, para mantener unidos los granos en el respaldo de papel, tela o plástico. Los abrasivos revestidos (lijas) se encuentran disponibles en hojas, cintas, rollos, conos, cilindros y discos, de diferentes tamaños.

## 5.2 CLASIFICACION DEL GRANO

Está muy extendida la clasificación del tamaño de los granos abrasivos en un sistema de numeración que corresponde al número de agujeros que tiene el tamiz, que los clasifica, por pulgada lineal. Así se tienen, entre otros, los tamaños:

|                   |                       |
|-------------------|-----------------------|
| granos gruesos:   | 14, 16, 20 y 24       |
| granos finos:     | 70, 80, 90, 100 y 120 |
| granos muy finos: | 150, 180, 220 y 240.  |

## 5.3 CONSTRUCCION DE LA HERRAMIENTA ABRASIVA

Los siguientes aspectos tienen un papel importante para la construcción de un disco de esmeril o herramienta abrasiva:

- a) el grano. Es el que realmente realiza el trabajo; debe tomarse en cuenta su tipo y tamaño;
- b) aglutinante. Es el material que aglomera y mantiene unidos los granos; puede ser una resina, goma, silicato aglutinante vitrificado o lacas;
- c) estructura. Es la disposición y densidad de los granos abrasivos en el aglutinante o aglomerante. Para indicar la estructura se ha establecido una escala numérica de 1 a 16, desde muy densa a muy abierta, respectivamente;

d) dureza. Es la medida de resistencia que ejerce el aglutinante en el sostenimiento de los granos abrasivos. Esta dureza debe ser compatible con la dureza del material que se trabaja, para permitir que el material abrasivo se vaya desprendiendo conforme avanza el trabajo. Para indicar la dureza se ha establecido una escala de letras de A a la Z, de suave a dura, respectivamente (Ver Figura 41).

#### 5.4 MARCADO DE LAS PIEDRAS ABRASIVAS

Para unificar criterios en la selección, las industrias que producen piedras abrasivas han establecido un sistema de marcado que tiene seis posiciones, las cuales indican: 1) el tipo de abrasivo, 2) tamaño del grano, 3) dureza, 4) estructura, 5) material y 6) referencia del fabricante; como se observa y explica en la Figura No. 41.

#### 5.5 MACHOTES ABRASIVOS

Es una práctica estandarizada, en muchas Centrales Hidroeléctricas con turbinas Pelton, el pulido fino de los cangilones para mantener las ruedas en condiciones óptimas. Si bien, prácticamente, el grado de pulido extra-fino no tiene influencia significativa en el rendimiento, sí se le atribuye influencia en el comportamiento frente a los defectos superficiales; lo cual justifica, siempre que la operación de la Central Hidroeléctrica lo permita, la ejecución de este trabajo.

Es frecuente, para la ejecución de trabajos de pulido fino, la fabricación de machotes abrasivos; los cuales consisten en polvo abrasivo fino adherido a machotes filamentosos, por medio de aglutinantes flexibles de resina. Estos machotes se adaptan a los cabezales de las amoladoras para obtener acabados superficiales de muy buena calidad en los trabajos.



## 5.6 PROCEDIMIENTO PARA EL AMOLADO Y PULIDO

Seguido de seleccionar el abrasivo más adecuado, se ofrece una serie de pasos a seguir para iniciar el amolado y pulido del cangilón.

Se puede decir que el amolado y pulido de cangilones de los rodetes Pelton es una práctica de arte, pues, el amolador deberá contar con bastante experiencia, ya que debe ser muy cuidadoso en el desarrollo del trabajo para no ocasionar desperfectos que induzcan a una falla hidráulica o falla en el material propio.

Para el proceso de amolado y pulido deberá contarse con los equipos, materiales y herramientas adecuadas, entre estos es muy importante disponer de una serie de plantillas del cangilón, las cuales deberán ser solicitadas al fabricante o, en todo caso, se podrán fabricar tomando como base el rodete de reserva para el caso que existiera o los planos respectivos con las medidas del cangilón.

Los pasos a seguir son los siguientes:

- a) seleccionar las plantillas de las diferentes partes del cangilón;
- b) verificar las medidas del cangilón y determinar las áreas soldadas a desbastar, tomando como referencia las plantillas de cada parte;
- c) desbastar el exceso de material en las áreas indicadas por las plantillas, utilizando una amoladora angular y discos abrasivos para desbaste de aceros de alta dureza;
- d) reparación de defectos por soldadura, tales como porosidades, socavaciones, etc., si existieran, para lo cual deben utilizarse fresas de acero (este tipo de fresa sirve para profundizar y ampliar los poros que deja la soldadura) luego, efectuar un nuevo aporte de material. Además, al inicio de la reparación se utilizan

estas fresas para agrandar los agujeros ocasionados por desprendimientos de material, debido a la cavitación; antes de efectuar la primera aportación de soldadura;

- e) acabado de las superficies reparadas con piedras abrasivas de alta velocidad y amoladora recta;
- f) pulido final con: discos de lija y amoladora angular, cilindros de lija y amoladora recta. Este pulido debe ser de muy buena calidad, para facilitar la descarga del cangilón. Los mejores acabados se logran utilizando granos de las lijas del mediano al fino.

Durante este procedimiento es necesario efectuar pruebas de medición, constantemente, con las plantillas, con el propósito de no sobrepasar la cantidad de material a desbastar. De lo contrario, eventualmente, se presentará la necesidad de hacer nuevos aportes de soldadura, lo cual incrementa los costos de reparación.

## C A P I T U L O VI

**INSPECCION FINAL.**

Al finalizar las reparaciones y una vez enfriado el cangilón a la temperatura ambiente, deberá inspeccionarse al 100%, elaborándose los reportes correspondientes.

**6.1 INSPECCION VISUAL**

Antes de las demás pruebas no destructivas finales, se efectúa la inspección visual, como primera medida, mediante personal experimentado, como se señaló con anterioridad. El objeto de esta prueba es el de determinar fallas mayores desde un principio, dentro de lo posible, después de concluir los trabajos de reparación del rodete.

En las áreas sometidas a poco esfuerzo ésta será la única prueba y su realización debe considerarse suficiente, para efectos de comprobación.

**6.2 INSPECCION DIMENSIONAL.**

Después de los trabajos de reconstrucción de los cangilones, será necesario realizar una inspección dimensional minuciosa. Con ella se obtendrá la seguridad de que las medidas finales son las adecuadas. Para el efecto, deben tomarse en cuenta los aspectos esenciales expuestos en el Capítulo II, numeral 2.2 "Procedimiento de Verificación Dimensional", (Pag. 17).

**6.3 TRATAMIENTO TERMICO****PROCEDIMIENTO**

El proceso de soldar crea tensiones internas en el material, las cuales, dependiendo de su magnitud y de las

características del material, pueden convertirse en un grave peligro y provocar fallas en la turbina.

El tratamiento térmico de revenido, cuando se realiza adecuadamente, permite reducir la concentración de tensiones creadas con la soldadura y mejora las propiedades de la misma, haciéndola menos frágil y más blanda.

La velocidad de calentamiento, la velocidad de enfriamiento, la temperatura y la duración del alivio son factores muy importantes en el tratamiento térmico o alivio de tensiones.

#### ALIVIO LOCAL

Cuando no es la totalidad de la pieza la que se somete al tratamiento térmico, sino solamente una porción de ésta, se habla de alivio local. Para realizar un tratamiento local se debe cuidar la zona de transición y el resto de la pieza; particularmente lo relacionado con el control de la temperatura en la zona a tratar y evitar que se creen gradientes térmicos importantes en el resto de la pieza.

Para alcanzar y controlar la temperatura de alivio, generalmente, se usan resistencias eléctricas y aparatos de control, con termopares y potenciómetros.

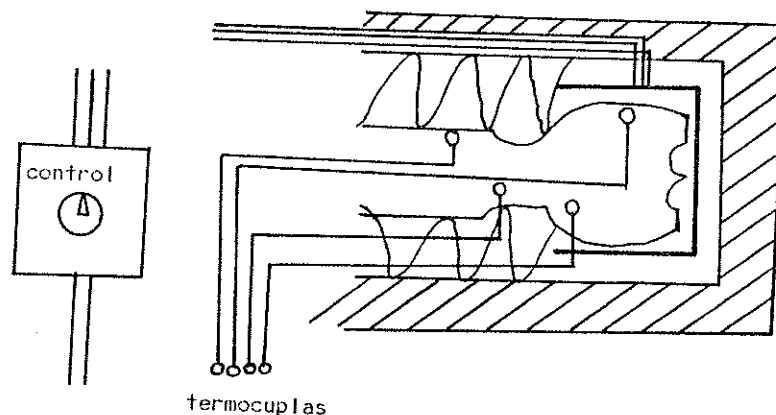


Fig. 42: Alivio local de un cangilón

Es indispensable el efectivo aislamiento de la pieza, especialmente, el de la zona de transición. De forma sencilla, un tanto rudimentaria, puede realizarse un tratamiento térmico local, mediante el uso de quemadores o antorchas de gas, con un buen control y buen aislamiento. En todo caso, deben evitarse los calentamientos locales que sobrepasen la temperatura definida de alivio, evitando el contacto directo de la llama con el material. Es conveniente disponer de un buen sistema para medir la temperatura, en diversos puntos y poder actuar, adecuadamente, con los quemadores.

Para realizar un tratamiento local de alivio, de forma satisfactoria, debe disponerse del equipo adecuado y contar con la práctica necesaria.

#### ALIVIO GLOBAL

Alivio global es cuando se somete toda la pieza al tratamiento térmico de alivio. Este se realiza dentro de un horno de dimensiones adecuadas y con el equipo de control de temperatura que permita seguir el desarrollo del tratamiento y controlar eficazmente la temperatura. Para situaciones de alivio global debe prestarse atención a la nivelación correcta de la pieza y a que no se produzcan importantes diferencias de temperatura entre distintos puntos de la pieza.

Si el horno es calentado mediante el uso de quemadores con llama debe disponerse de chapas deflectoras, necesarias para evitar la incidencia directa de la llama en la pieza.

Deberá distribuirse suficiente cantidad de termopares en la pieza, para medir su temperatura superficial en zonas de distintos espesores, distribuidas geoméricamente en la pieza. También se colocarán termopares ambientales para medir la temperatura ambiental del horno. El propósito es obtener una variación gradual y suave de la temperatura, evitando en todo momento el surgimiento de diferencias térmicas que originen tensiones en la pieza.

El horno puede estar construido de forma simple, con paredes gruesas de ladrillo y con puerta o techo removible; debe poseer ventilación adecuada para el escape de gases.

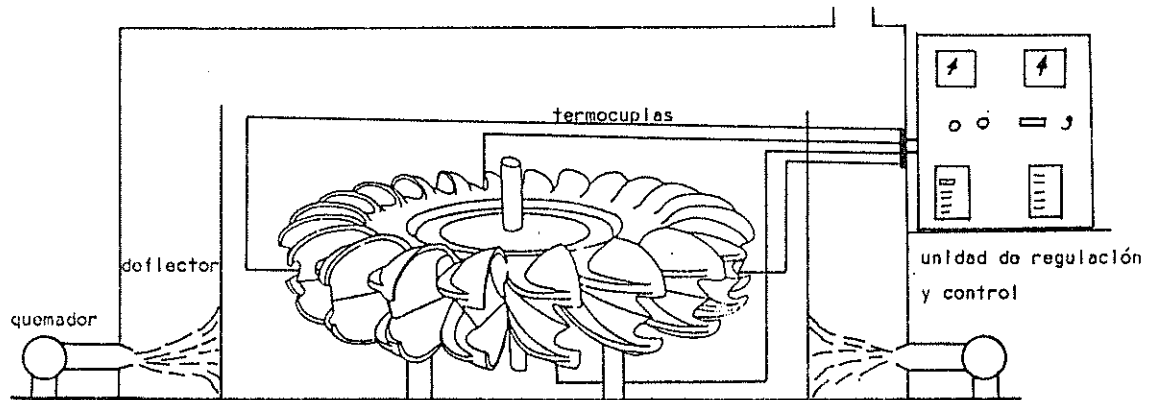


Fig. 43: Horno para alivio global.

#### PROCEDIMIENTO DE ALIVIO DE TENSIONES PARA EL RODETE DE LA HIDROELCTRICA AGUACAPA

El procedimiento de alivio para este caso específico, considera los siguientes parámetros básicos:

MATERIAL: Cr/Ni 13/4

ESPESOR: 300 mm.

ASCENSO LIBRE HASTA: 100 °C

VELOCIDAD DE ASCENSO: 55 °C/Hora  
(Calentamiento Máximo)

TEMPERATURA DE ALIVIO: 570, ± 10°C

TIEMPO DE ALIVIO: (Depende del espesor soldado. Aproximadamente, para espesores de 10 mm., hasta 2 horas)

VELOCIDAD DE DESCENSO: 55 °C/Hora, temperatura controlada.

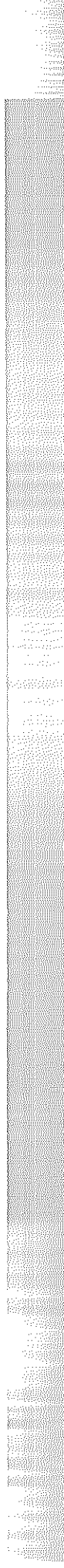
DESCENSO AL AIRE CALMO,  
HORNO CERRADO: 300 °C.

#### 6.4 ENSAYOS POR LIQUIDO PENETRANTE

Esta prueba tiene por objeto la determinación de fallas en la superficie de las zonas reparadas. Con ella se comprueba si se obtuvo un buen control en todas las actividades desarrolladas y, por ende, un buen resultado de la reparación.

Las superficies sujetas a inspección deben estar secas y libres de polvo, aceite u otras impurezas que dificulten la penetración del colorante o la segura determinación de la existencia de alguna falla.

El procedimiento de ensayo se describió en el Capítulo II, numeral 2.3 "Procedimiento para la inspección por líquidos penetrantes en los cangilones" (Pág. 21).





## CAPITULO VII

**COSTOS**

## 7.1 ANALISIS DE COSTOS

Los principales componentes del costo de soldadura son:

- a) costos de materiales y consumibles,  
electrodo,  
fundente,  
gases de protección,  
energía Eléctrica;
- b) costos de mano de obra;
- c) gastos generales.

Los dos primeros ítemes son costos directos de soldadura; sin embargo, los gastos generales incluyen numerosos elementos indirectamente asociados con la soldadura, como son: depreciación, mantenimiento, capacitación de personal, supervisión técnica, etc.

**COSTOS DE MATERIALES Y CONSUMIBLES**

Considerando que existen muchos procesos de soldadura y que cada uno de ellos tiene rendimientos diferentes, la cantidad total de consumibles que deben adquirirse varía de manera considerable.

La tabla siguiente señala los requerimientos de consumibles para varios procesos de soldadura.

| Proceso                         | Eficiencia de Deposición % | Pérdida de Electrodo   |                        | Consumibles/100 Kg. Metal depositado |               |          |
|---------------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------------|---------------|----------|
|                                 |                            | Pérdida por Colillas % | Eficiencia Electrodo % | Electrodo (Kg)                       | Fundente (Kg) | Gas (m3) |
| Electrodo Manual Celulósico     | 60                         | 12                     | 48                     | 155                                  | -             | -        |
| Electrodo Manual Rutílico       | 70-80                      | 12                     | 68-58                  | 145-170                              | -             | -        |
| Electrodo Manual Bajo Hidrógeno | 72                         | 12                     | 60                     | 160-170                              | -             | -        |
| Mig (Cortocircuito)             | 93                         | 2                      | 91                     | 110                                  | -             | 17-42    |
| Mig (Spray)                     | 95                         | 2                      | 93                     | 108                                  | -             | 7-11     |
| Tubular con protección          | 83                         | 1                      | 82                     | 122                                  | -             | 4-20     |
| Tubular sin protección          | 80                         | 1                      | 79                     | 126                                  | -             | -        |
| Arco Sumergido                  | 99                         | 1                      | 98                     | 102                                  | 85-100        | -        |

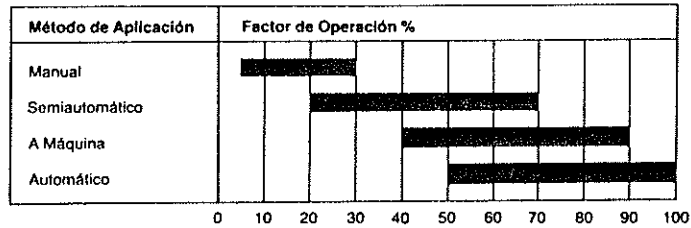
Otro de los elementos a considerar es la energía eléctrica: para todos los procesos de soldadura por fusión, puede estimarse un consumo de 4.0 kWh por cada kilogramo de soldadura de acero depositada. Esto toma en cuenta la pérdida de energía en el equipo, como también el máximo de carga kVA y es, por lo tanto, un valor promedio.

$$\text{kWH} = \frac{\text{Volts} \times \text{Factor de potencia} \times \text{tiempo en horas}}{1000}$$

#### COSTO DE MANO DE OBRA

El costo de mano de obra, para producir una estructura soldada, depende de la cantidad de soldadura necesaria, la velocidad de deposición y el factor de operación.

El factor de operación se define como la razón entre el tiempo real de arco y el tiempo total que se paga al operador, expresado en porcentaje. Así, el rango de factores de operación dependerá del proceso de soldadura y su aplicación.



Los dos principales elementos que determinan los costos de mano de obra son: velocidad de deposición y factor de operación.

A continuación se muestran las relaciones generales entre: velocidad de deposición y costo de mano de obra y entre factor de operación y costo de mano de obra.

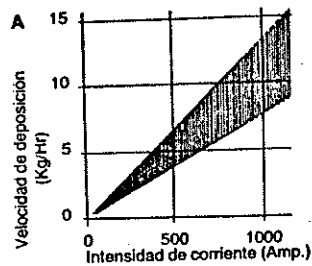


Fig. 44: Muestra que la cantidad de deposición aumenta a medida que se eleva la corriente de soldadura. Esto se aplica, generalmente, a los procesos de soldadura al arco.

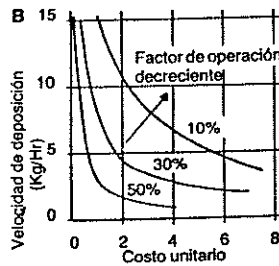


Fig. 45: Muestra que, en cantidades altas de deposición, los costos de mano de obra por kilogramo de metal depositado tienden a disminuir.

## COSTOS DE MATERIALES POR RODETE REPARADO

|  |                   |
|--|-------------------|
| Electrodo UTP 6635                               | Q 2,152.40        |
| Cilindro de gas propano                          | Q 134.00          |
| Crayones térmicos                                | Q 90.00           |
| Discos de lija diámetro 5" grano No. 80          | Q 638.00          |
| Fresas esféricas de acero No. 57/3               | Q 31.50           |
| Piedras (muelas) abrasivas cilíndricas<br>No. 30 | Q 395.40          |
| Discos abrasivos diámetro 5" A30RBF8             | Q 235.20          |
| Cilindros de lija grano No. 60                   | <u>Q 1,103.40</u> |
| TOTAL:   | Q 4,779.90        |

## 7.2 EQUIPO UTILIZADO

Una soldadora de corriente directa.

Un horno portátil porta electrodo, para temperatura de 300 grados centígrados.

Un equipo de precalentamiento tipo antorcha, de gas propano.

Dos cobertores de asbesto.

Una amoladora angular.

Una amoladora recta.

Plantillas de dimensionamiento de los cangilones.

Molde de cobre para soldar los perfiles del cangilón.

Un equipo de líquidos penetrantes, para ensayos no destructivos.

Equipos de protección individual para el personal.

## 7.3 PERSONAL UTILIZADO

Un soldador

Un tallador de cangilones

Un técnico calificado en ensayos no destructivos

Un supervisor técnico.

#### 7.4 RESULTADOS E ILUSTRACIONES

Para una apropiada visualización del procedimiento de reparación de los rodetes Pelton, se presenta a continuación una secuencia de fotografías, las cuales ilustran los procedimientos, equipos y materiales utilizados, así como los resultados obtenidos.

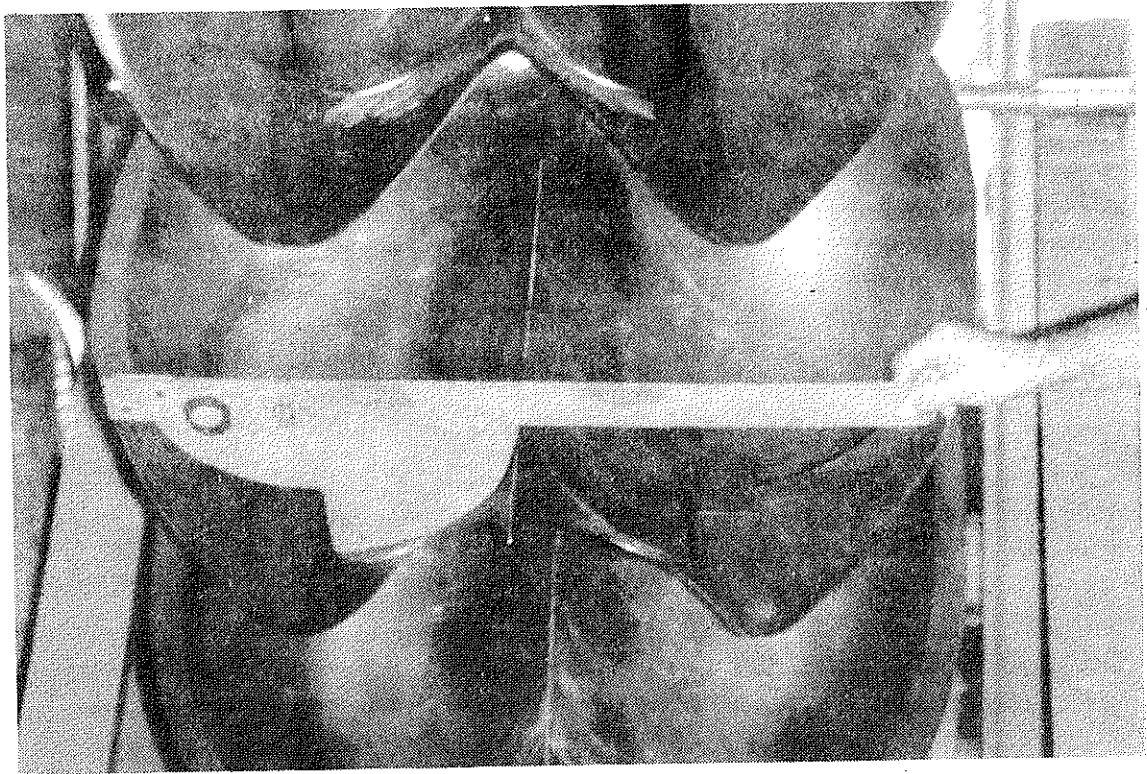


Fig. 46: Medición interior parte frontal, Plantilla No. 1.



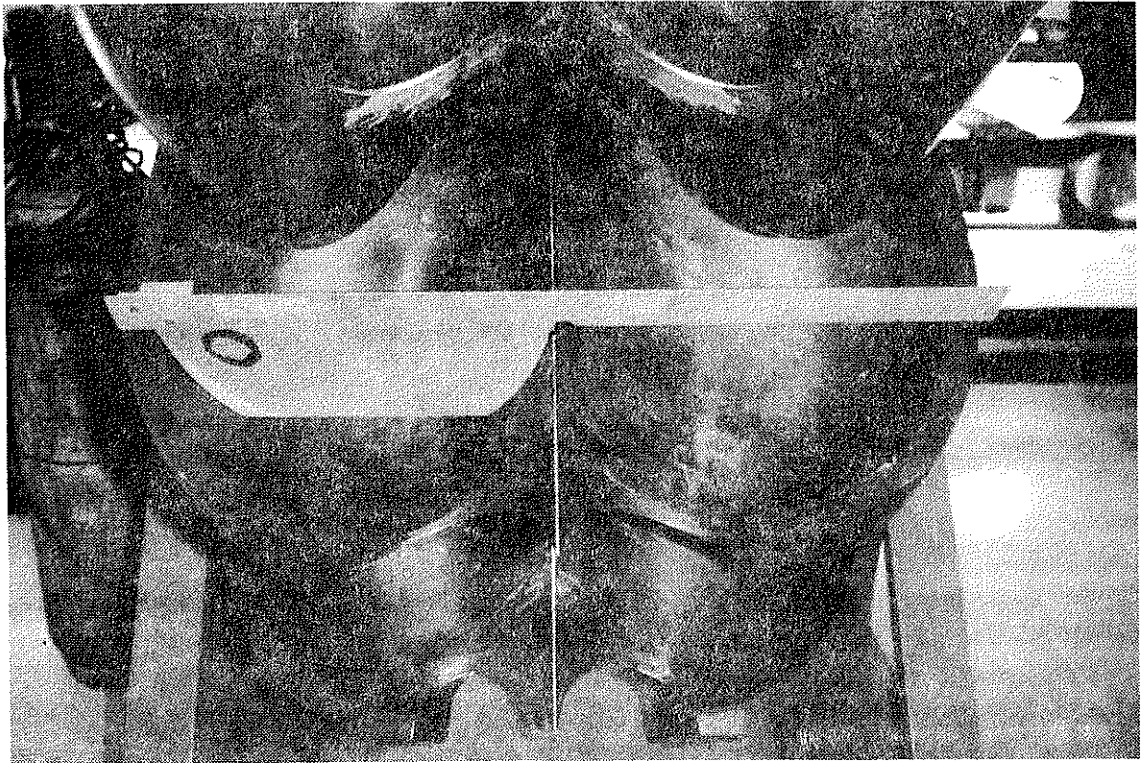


Fig. 47: Medición interior, parte frontal, Plantilla No. 2.

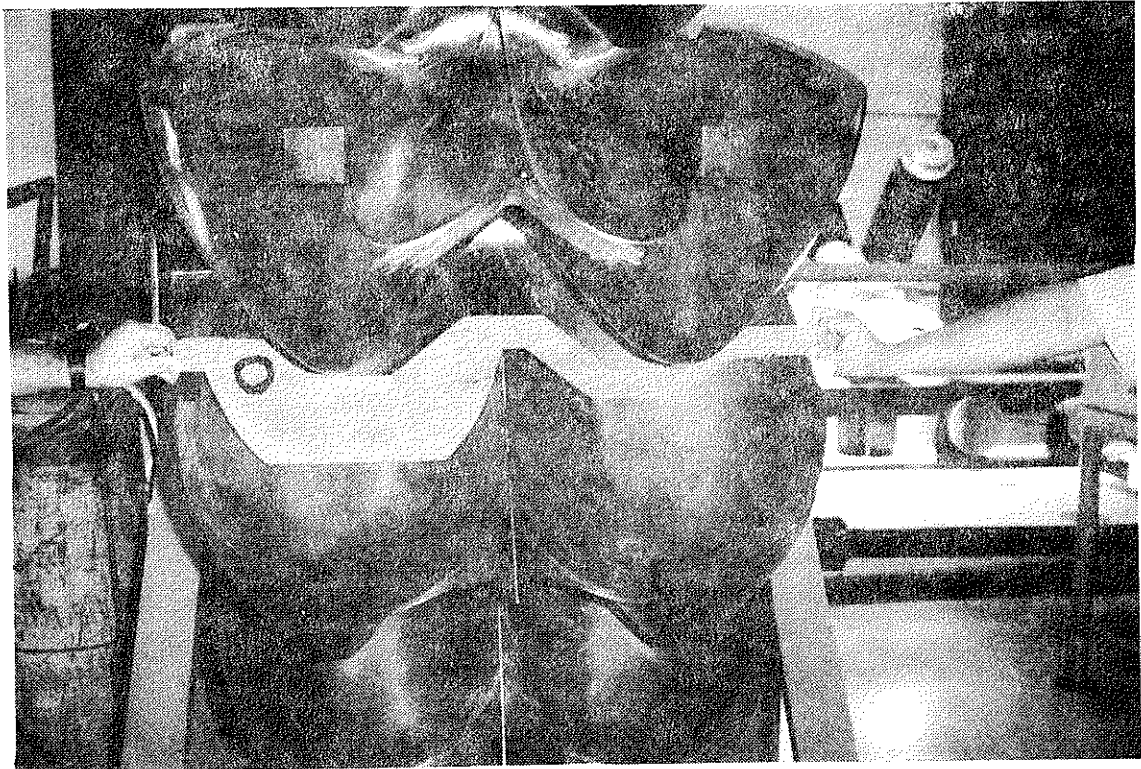
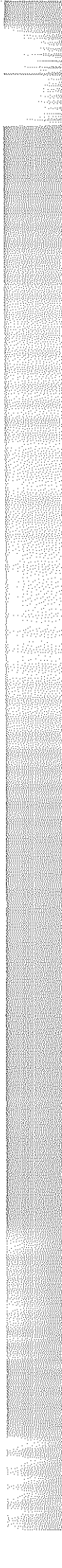


Fig. 48: Medición al centro, plantilla No. 3.





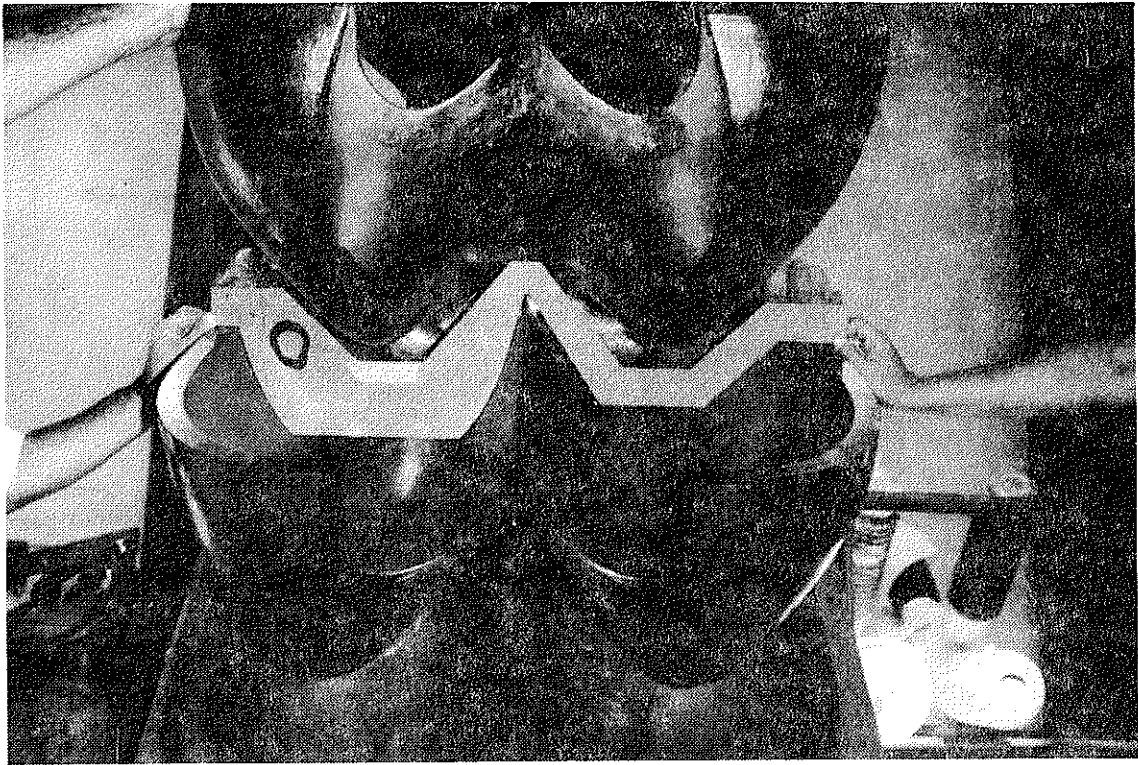


Fig. 49: Medición interior parte superior, Plantilla No. 4.

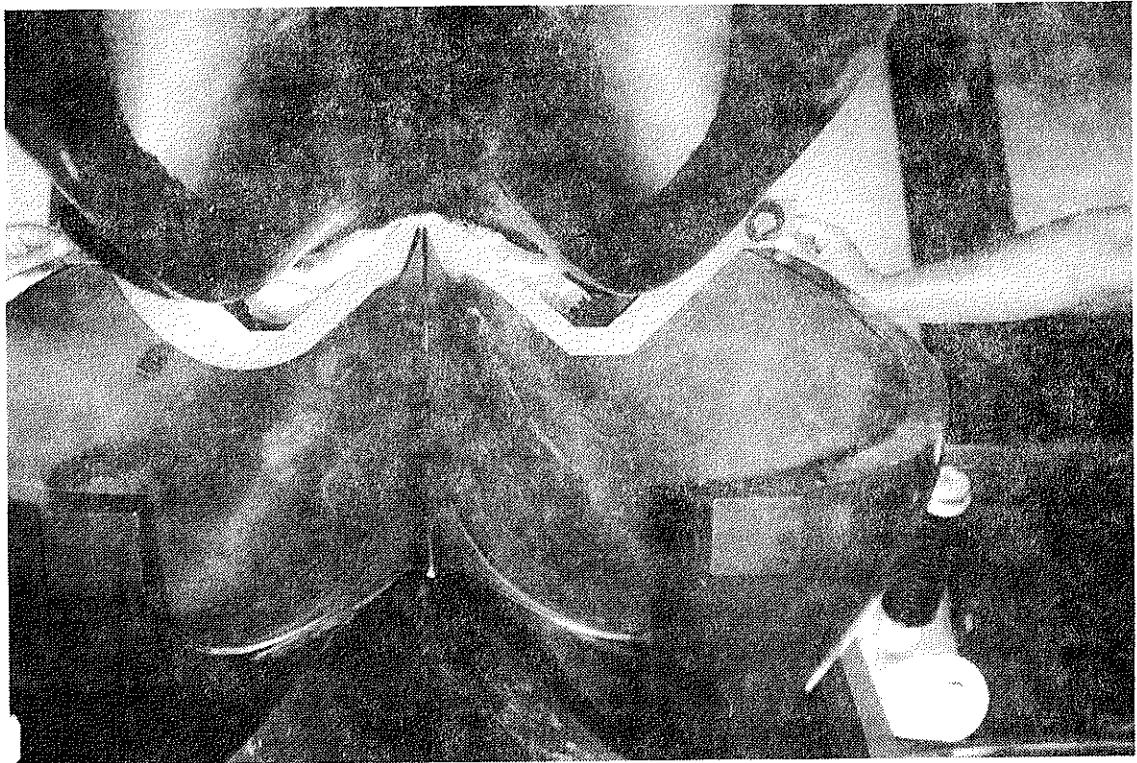


Fig. 50: Medición interior, parte superior, Plantilla No. 5.



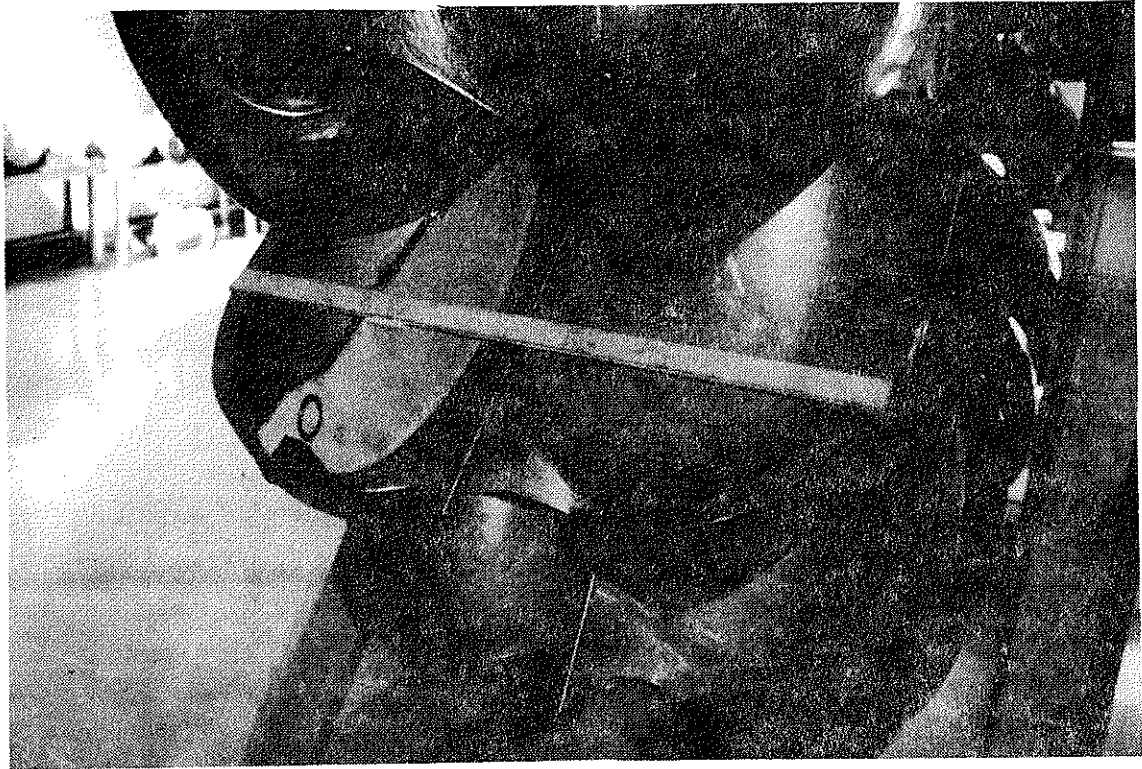


Fig. 51: Medición de la profundidad a lo largo del cangilón

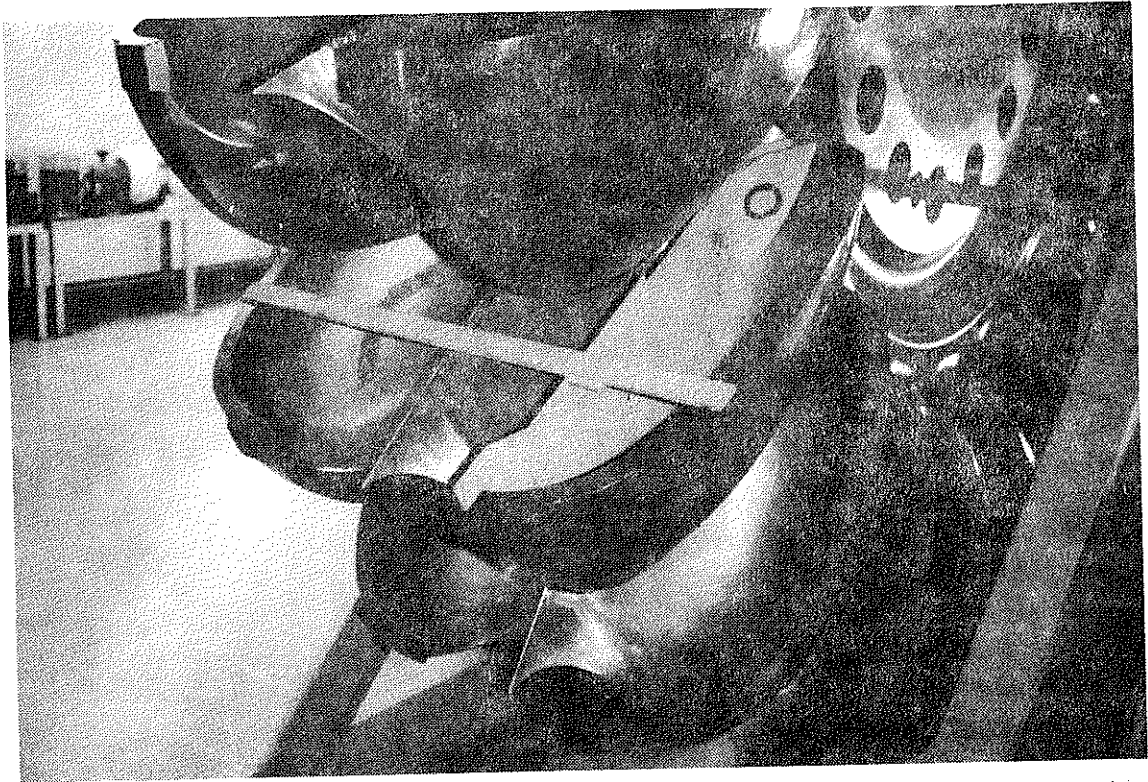


Fig. 52: Medición de la profundidad a lo largo del cangilón





Fig. 53: Plantilla para verificar la forma del perfil.

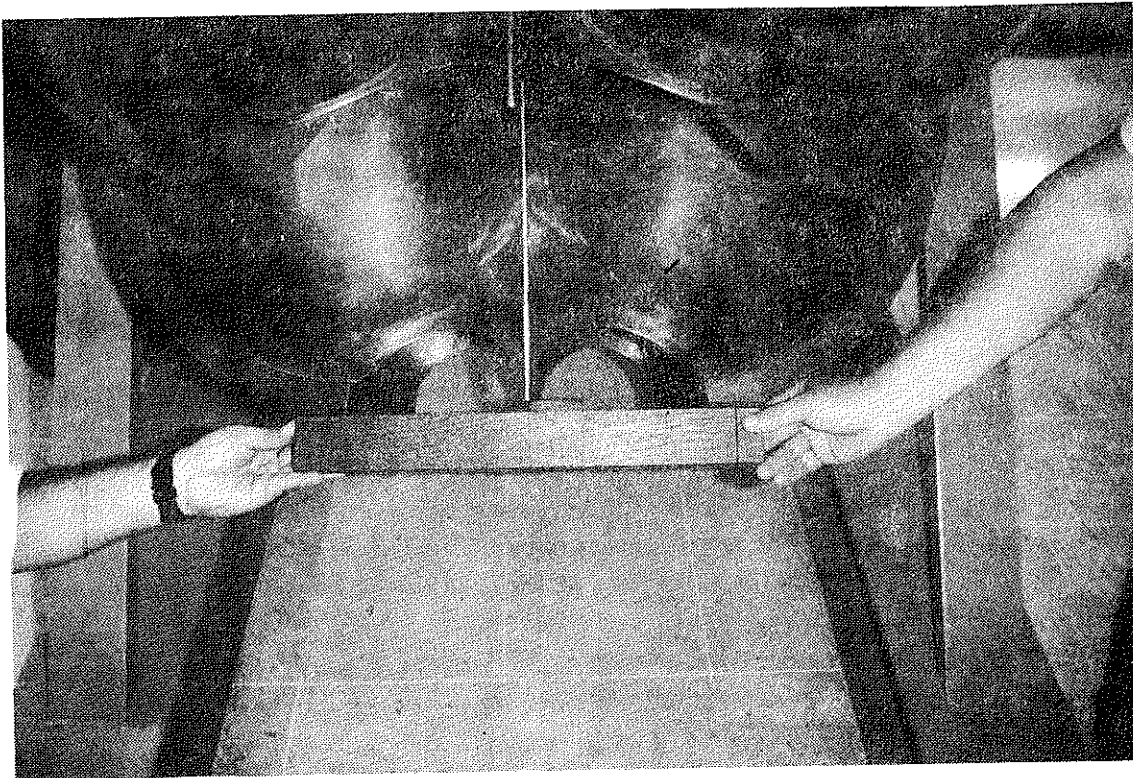


Fig. 54: Tamaño del perfil.



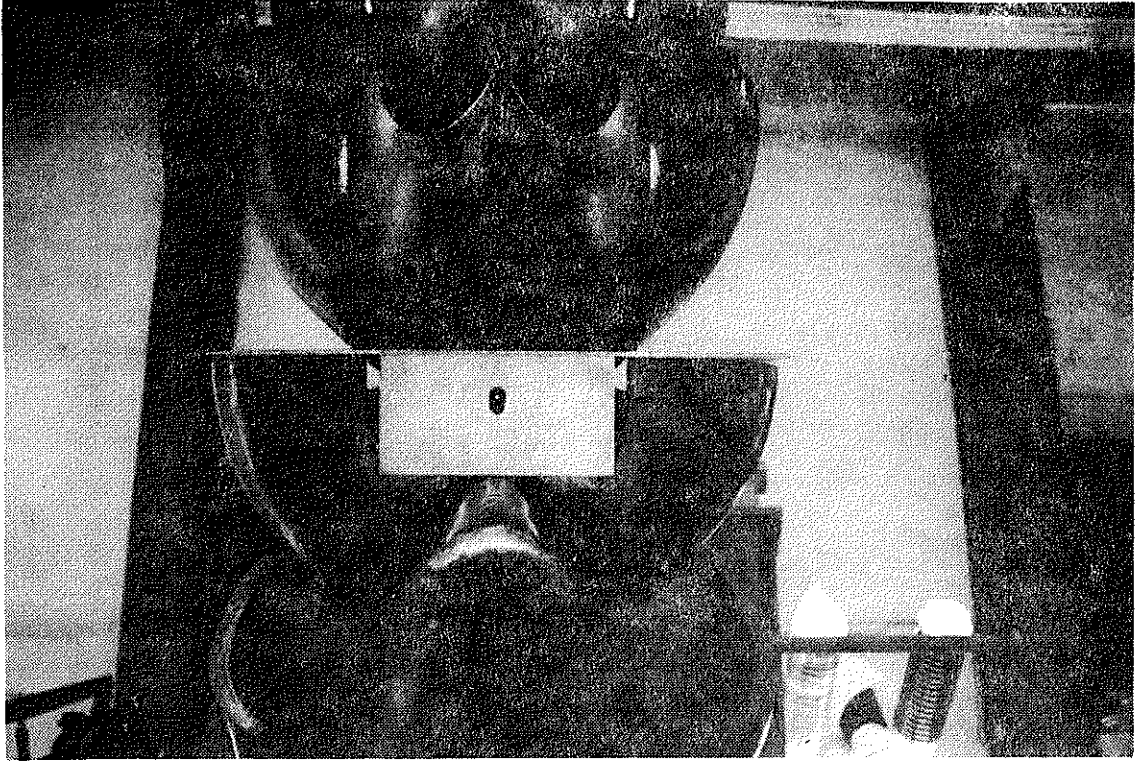


Fig. 55: Centrado del perfil.

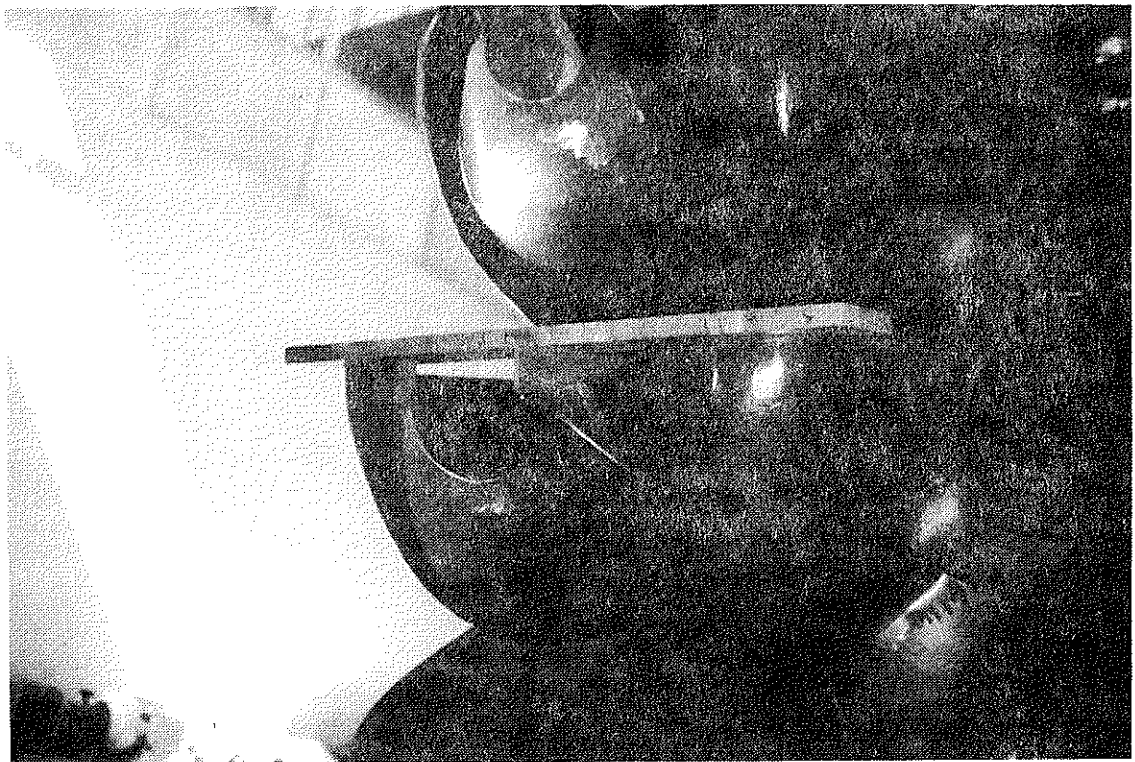


Fig. 56: Dimensionamiento de la arista desde el perfil.





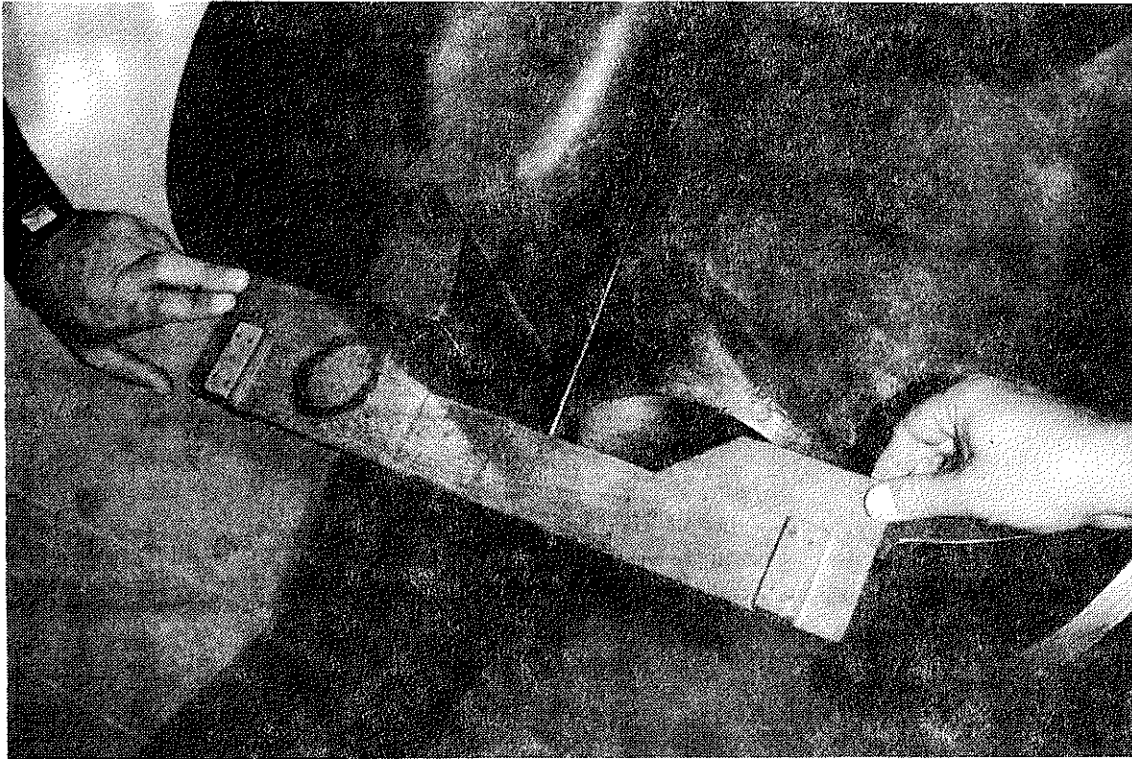


Fig. 57: Control dimensional de la escotadura (1)

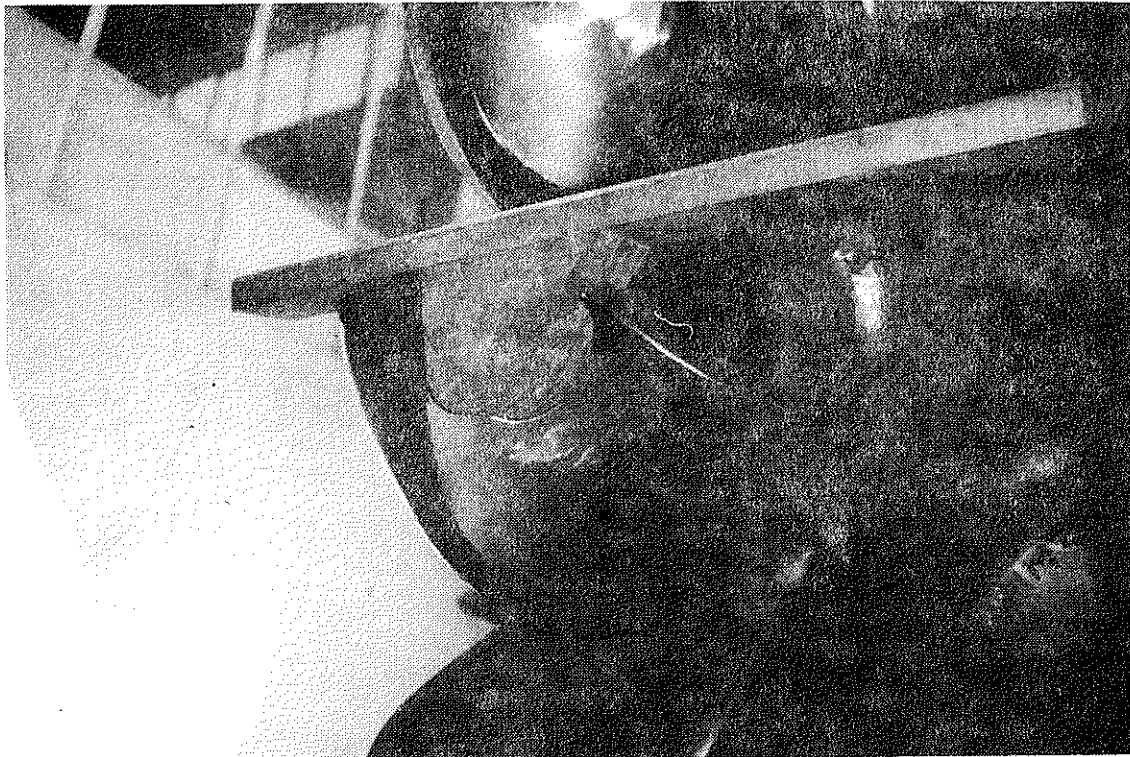


Fig. 58: Control dimensional de la escotadura (2)



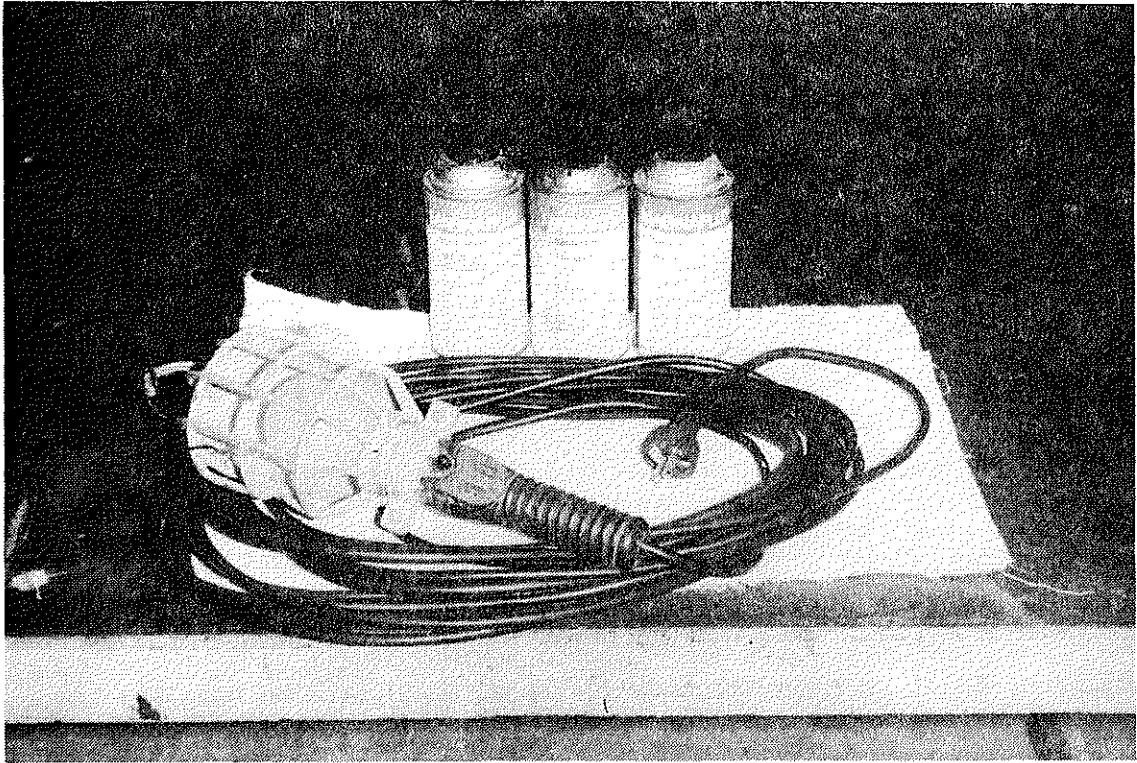


Fig. 59: Equipo para inspección por líquidos penetrantes.

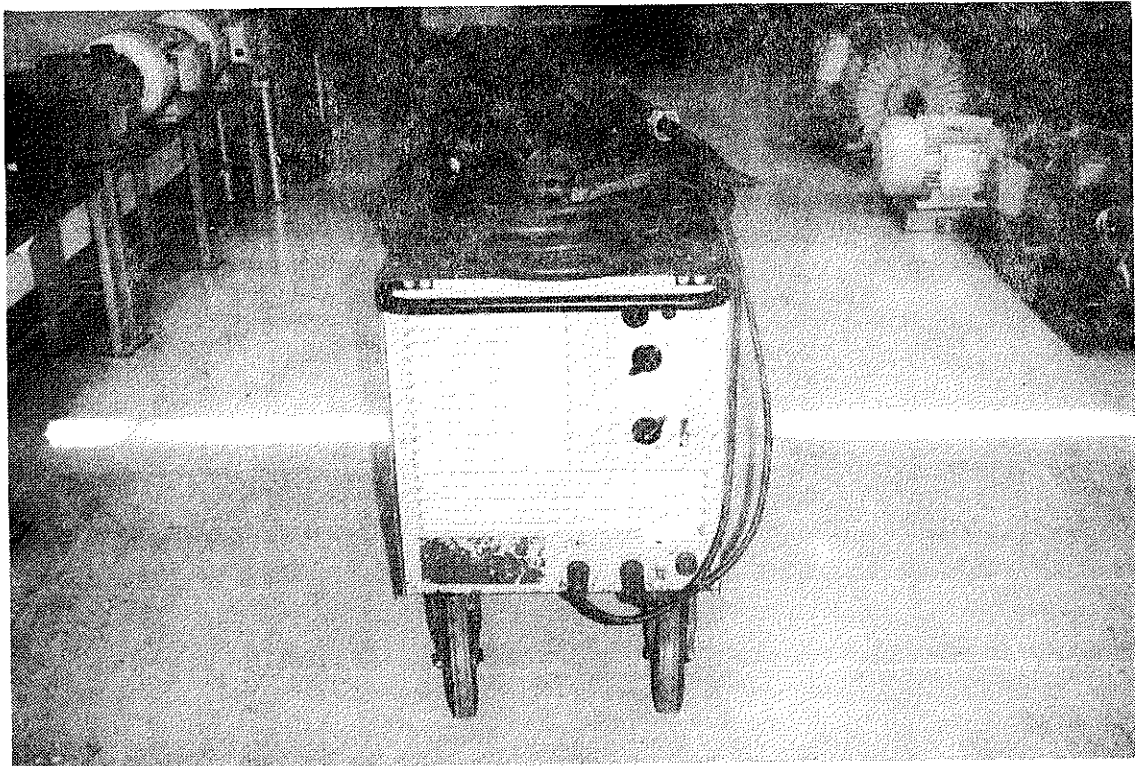


Fig. 60: Equipo de soldadura para electrodo revestido.



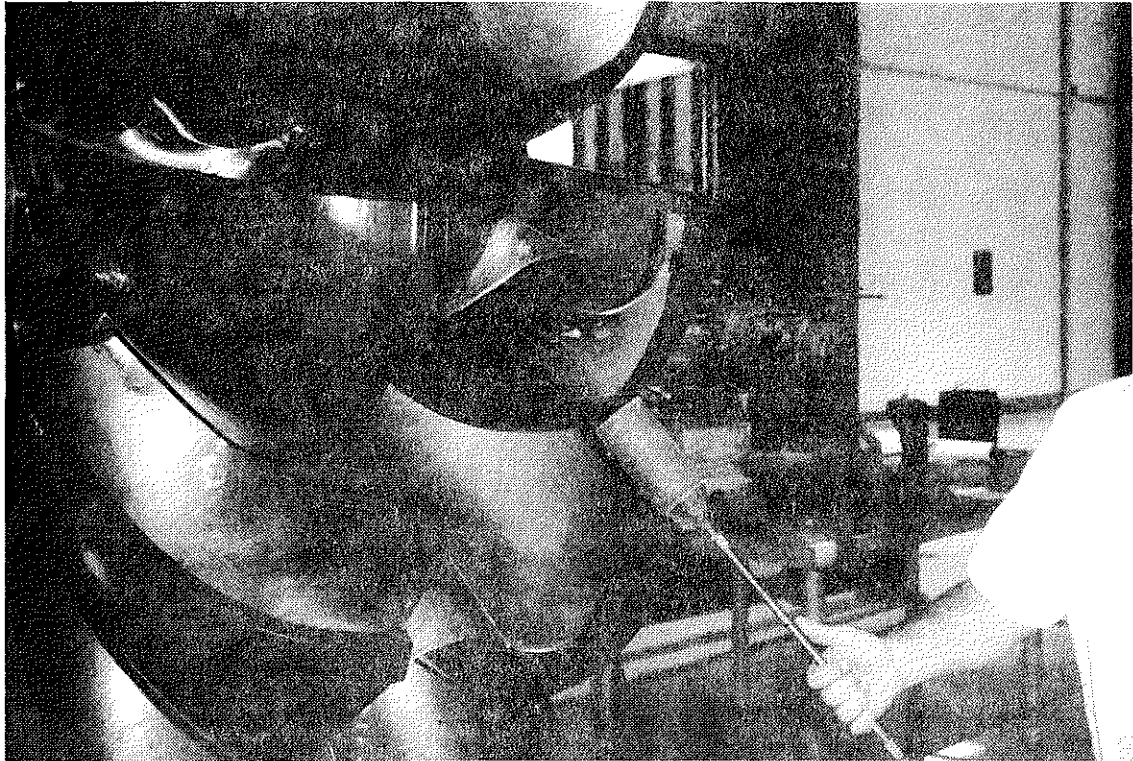


Fig. 61: Proceso de precalentamiento.

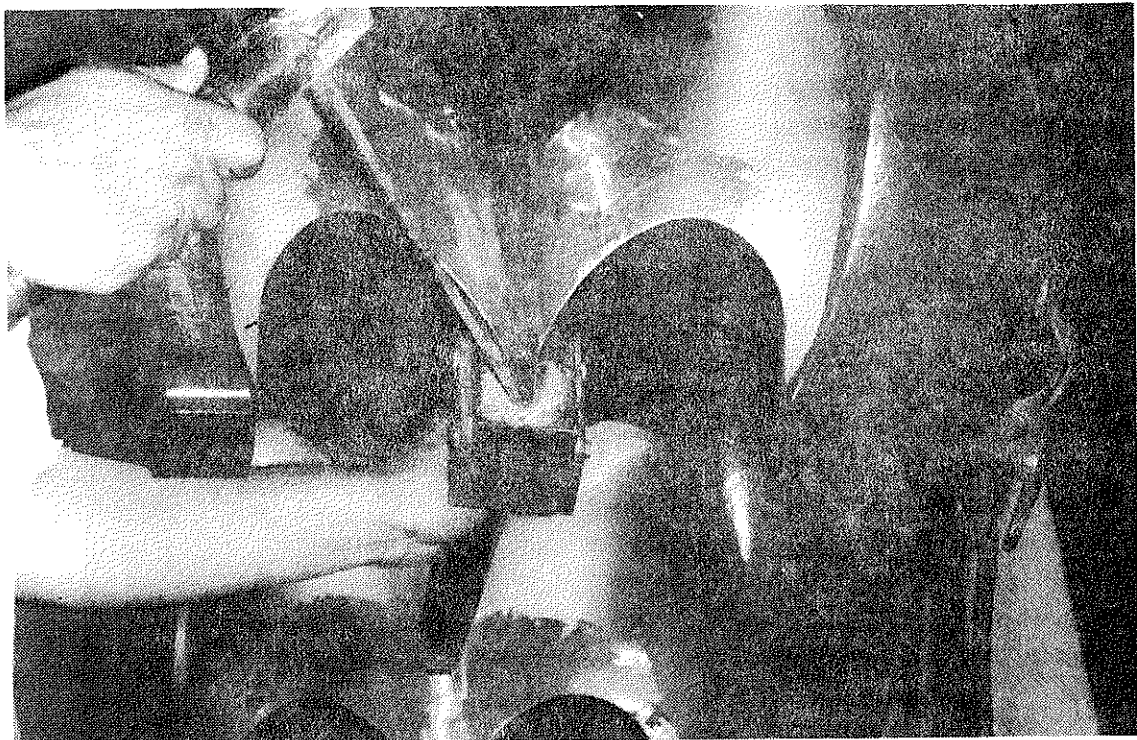


Fig. 62: Inicio de la soldadura apoyada con una plantilla de cobre



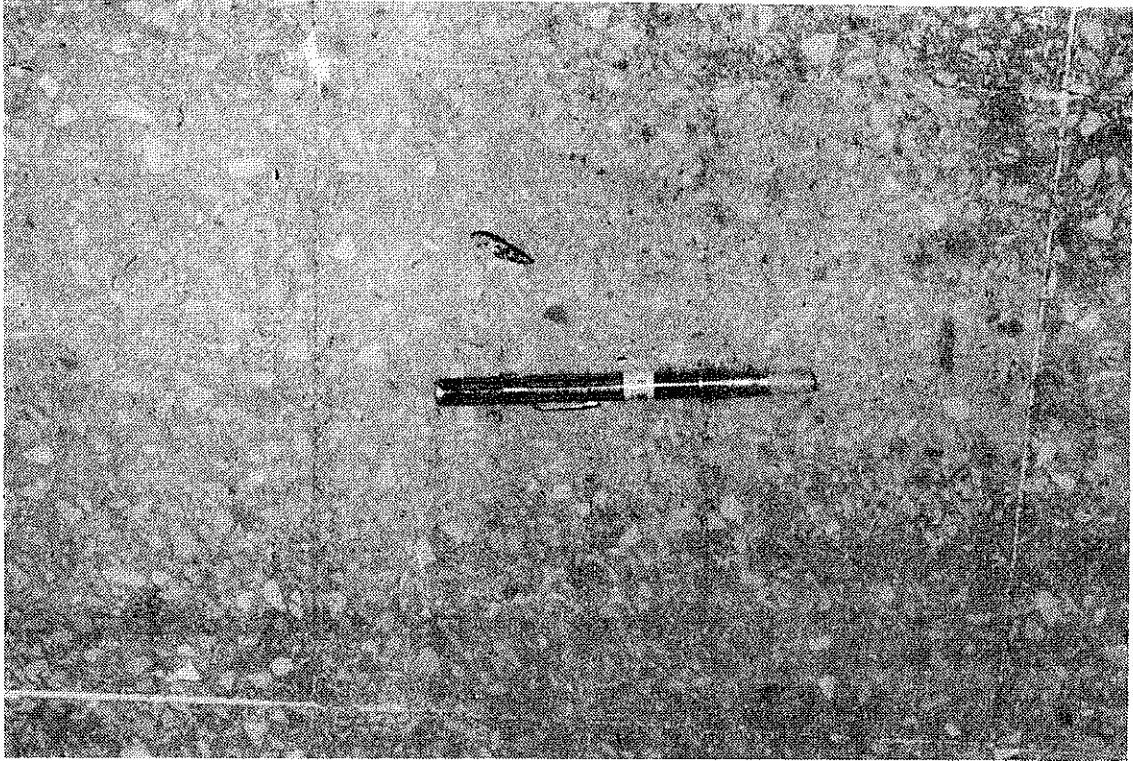


Fig. 63: Crayón termocolor.

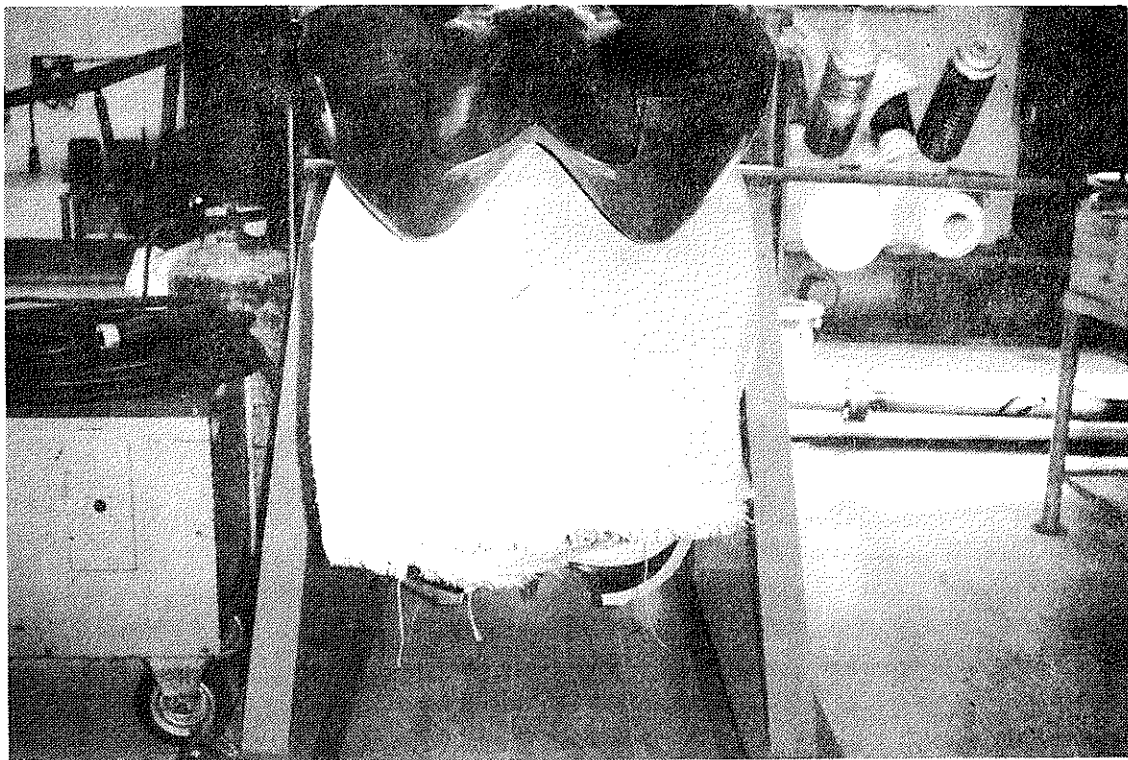


Fig. 64: Sábana de asbesto envolviendo el cangilón para propiciar un enfriamiento lento.





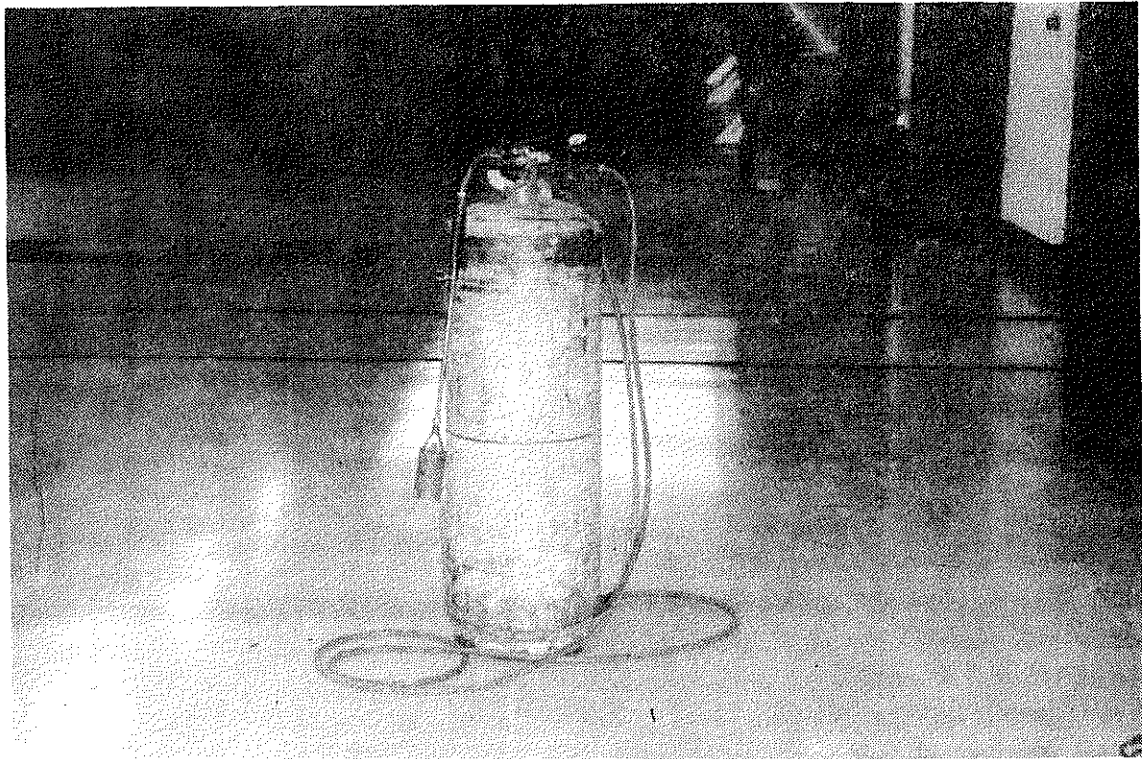


Fig. 65: Equipo de precalentamiento.

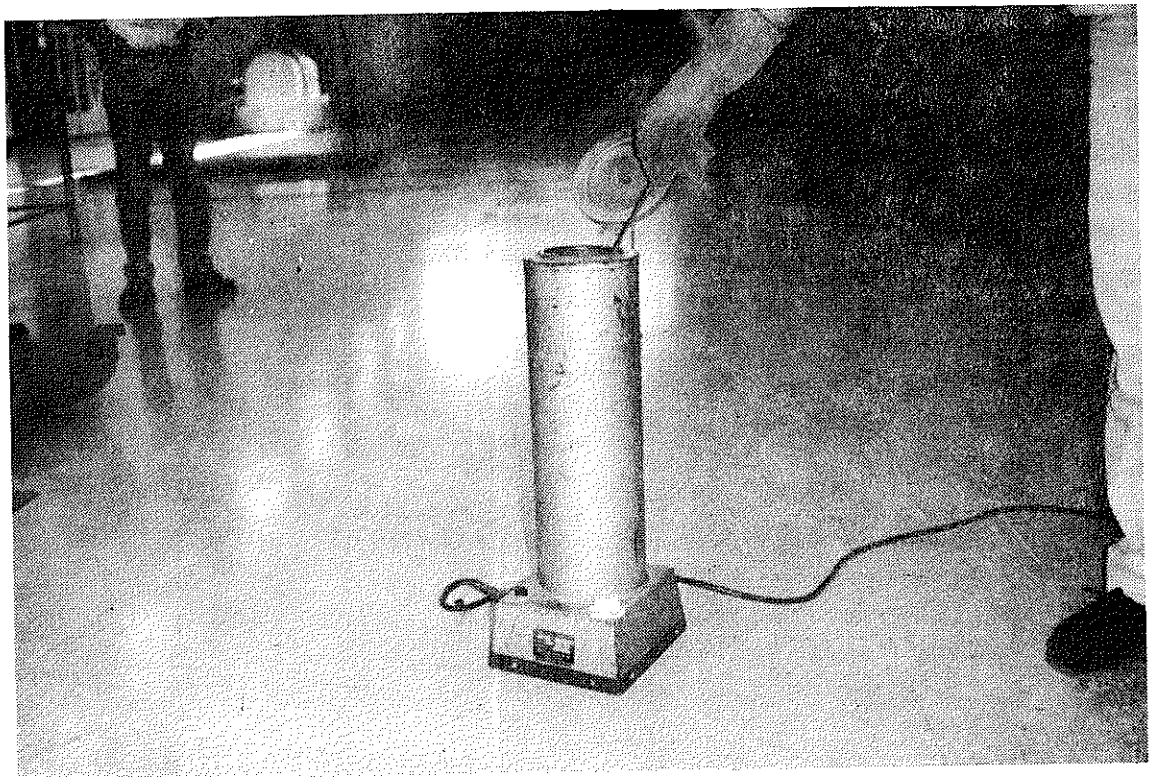
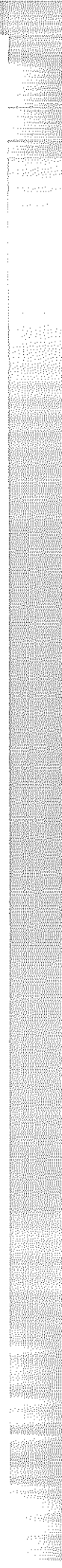


Fig. 66: Horno eléctrico portátil, para electrodo.



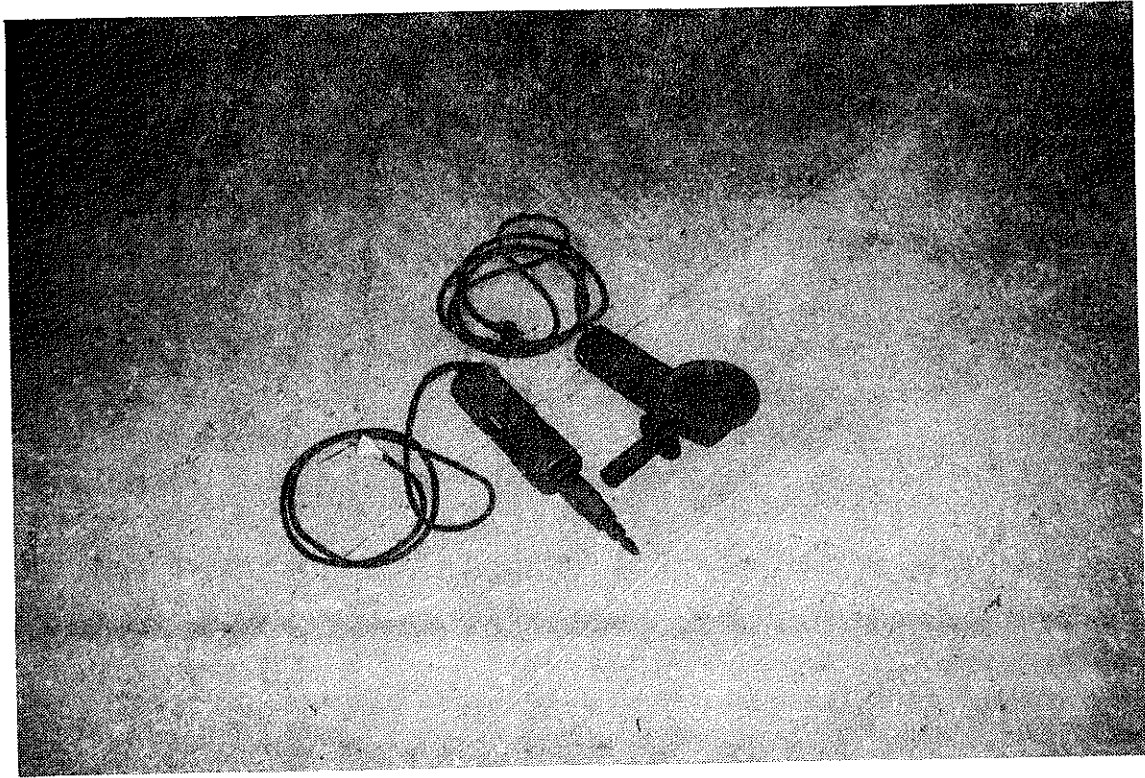


Fig. 67: Amoladora recta y amoladora angular

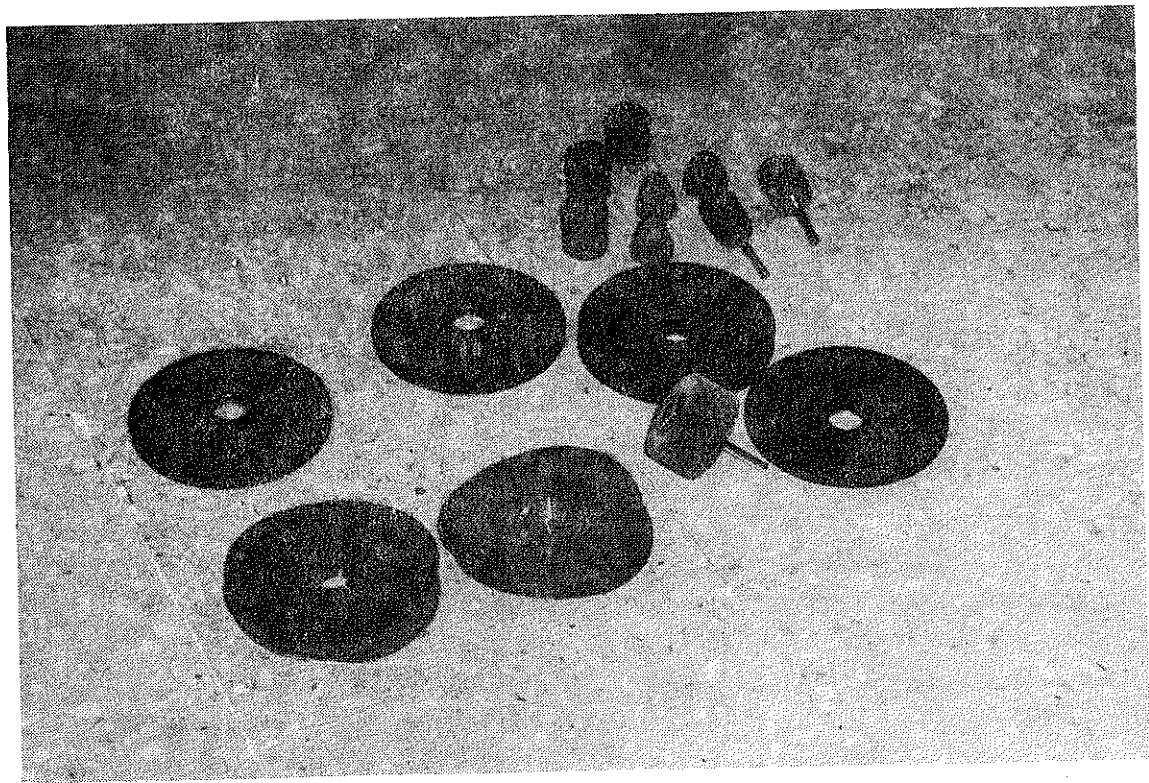
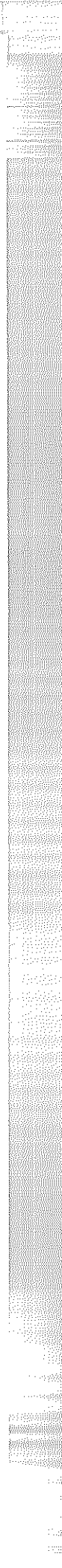


Fig. 68: Materiales abrasivos.



En las figuras se muestran las diferentes plantillas diseñadas para la reconstrucción de cangilones de los rodetes Pelton; en éstas puede observarse que poseen diferentes formas y tamaños, debido a que fueron elaboradas para su colocación en cinco puntos distintos, con el fin principal de medir el ángulo a lo largo de la arista y medir el ángulo de descarga del cangilón (ver figuras 46, 47, 48, 49 y 50).

Puede observarse, también, las dos plantillas para medir la profundidad a lo largo del cangilón, en ambas cucharas, una para el lado derecho y otra para el lado izquierdo, apoyadas sobre la arista central y las orillas del cangilón (ver figuras 51 y 52).

Una parte importante a señalar en el dimensionamiento del cangilón es la forma y tamaño del perfil para reducir la cavitación (ver figuras 53, 54, 55 y 56). A continuación de éstas se pueden ver las plantillas utilizadas para el dimensionamiento de la escotadura (ver figuras 57 y 58).

En la figura 62 se observa que la soldadura se comienza con un molde que tendrá la forma final del perfil; para este caso específico, el molde fue diseñado en una aleación de cobre y una barra ajustable de acero entre el perfil a soldar y el dorso del cangilón subsiguiente.

Se ha comprobado que, después de aplicados los procedimientos de reconstrucción de los rodetes Pelton, los resultados obtenidos fueron los requeridos, es decir, obtención del 100% de eficiencia en la turbina, con un mínimo de cavitación en los cangilones, después de 600 horas de trabajo. A la fecha no se ha detectado ninguna fisura ni fracturas en los cangilones, ocasionadas por concentración de tensiones debido a las soldaduras, maquinado o fatiga del material del cangilón; ya que, éstas fueron aliviadas, adecuadamente, después del proceso de reconstrucción.

La Central Hidroeléctrica Aguacapa está conformada por tres turbinas del tipo Pelton, con capacidad de 30 MW. cada una, para un total de 90 MW., las cuales, después de los mantenimientos de reconstrucción, han operado sin ninguna perturbación que disminuya el rendimiento de las unidades generadoras.

## CONCLUSIONES

1. La cavitación es un fenómeno no deseado que aparece en las turbinas Pelton, por las mismas condiciones hidráulicas del medio; generalmente, acompañada por erosión, causada por los sólidos en suspensión en el flujo de agua. Cuando los defectos causados por ésta son considerables, afectan la eficiencia de la unidad generadora.
2. Todos los defectos del tipo fisura localizados en posiciones con alto esfuerzo, deben ser eliminados en forma inmediata, para evitar el colapso de las partes afectadas.
3. Cuando se efectúen reparaciones en las turbinas de la Hidroeléctrica Aguacapa o en cualquier otra central con rodetes del tipo 13/4 Cr/Ni, deben utilizar electrodo revestido UTP 6635.
4. En las reparaciones de los rodetes al Cr/Ni, deberá anteceder un adecuado precalentamiento, evitando, de esta forma, altas concentraciones de esfuerzos en la soldadura. Durante y después del proceso de soldadura deberán evitarse las corrientes de aire y, por consiguiente, el enfriamiento brusco.
5. El amolado y pulido juega un papel muy importante, hidráulicamente, debido a que con las superficies lisas el flujo de agua descarga con más facilidad en el cangilón.
6. La concentración de tensiones, debido a la aplicación de soldadura, puede convertirse en un grave peligro, llegando a provocar fallas en la turbina.
7. Es necesario contar con el equipo básico durante los procedimientos de reparación, especialmente, las distintas planillas, para dimensionar el cangilón, conforme avanzan los trabajos.

## R E C O M E N D A C I O N E S

1. El personal de mantenimiento deberá efectuar inspecciones periódicas, para evaluar los daños producidos por la cavitación y erosión, los cuales deben eliminarse lo más pronto posible y procurar mantener superficies bien pulidas. Las inspecciones deben realizarse cada seis meses.
2. Se considera necesario utilizar, durante la evaluación de los rodetes, todos los métodos al alcance para identificar cualquier daño, especialmente, los de tipo fisura, dejando los registros respectivos como ficha histórica de la unidad.
3. Es importante que las reparaciones por soldadura en las turbinas al 13/4 Cr/Ni, sean soldadas con electrodos de la misma característica del material base. Las razones para este principio son las propiedades mecánicas, especialmente, el punto cedente o de deformación y el alto límite de fatiga.
4. Antes de iniciar la reconstrucción del rodete debe elaborarse un listado de equipos y materiales necesarios para llevar a cabo de manera correcta los procedimientos que se describen en este trabajo; los que deben estar disponibles, previo inicio del proceso.
5. Durante el proceso de amolado y pulido, los abrasivos deben utilizarse en una secuencia que va del más grueso al más fino, según sea necesario, para obtener mejores resultados.
6. Cuando se trata de reparaciones mayores, en las cuales se aporte una cantidad considerable de electrodo, se recomienda un tratamiento térmico para aliviar las tensiones inducidas por el proceso de reconstrucción.
7. Es necesario que, cuando se suministren ruedas Pelton, se exija al fabricante que incluya en el suministro las plantillas con las dimensiones de las diferentes partes del cangilón, ya que son de vital importancia para realizar las reparaciones. Dichas plantillas facilitan el trabajo y permiten mantener las dimensiones originales.



## B I B L I O G R A F I A

1. ABENDE (Associação Brasileira de Ensaios não Destrutivos)  
Ensaio na Destrutivo-Líquido Penetrante  
Brasil
  
2. ABENDE (Associação Brasileira de Ensaios não Destrutivos)  
Líquidos Penetrantes  
Brasil
  
3. AVNER, Sydney H.  
Introducción a la Metalúrgica Física  
2da. Edición, México  
Editorial Mc Graw-Hill, 1980.
  
4. BURGHERR O. Gut K. and Werner A.  
Repair Welding of Turbine Runners  
Part 1 and 2  
London, Reprinted from Water Power,  
September and October issues, 1962.
  
5. COMA, Eric y Salvans  
Apuntes de pláticas sobre capacitación para Operación y  
Mantenimiento de Turbinas  
Guatemala, Consorcio Lami, 1987
  
6. DOYLE, Lawrence E.  
Procesos y Materiales de Manufactura para Ingenieros  
3ra. Edición, México  
Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.
  
7. ENCINAS, Manuel Polo  
Turbomáquinas Hidráulicas  
México, Editorial Limusa, 1976.

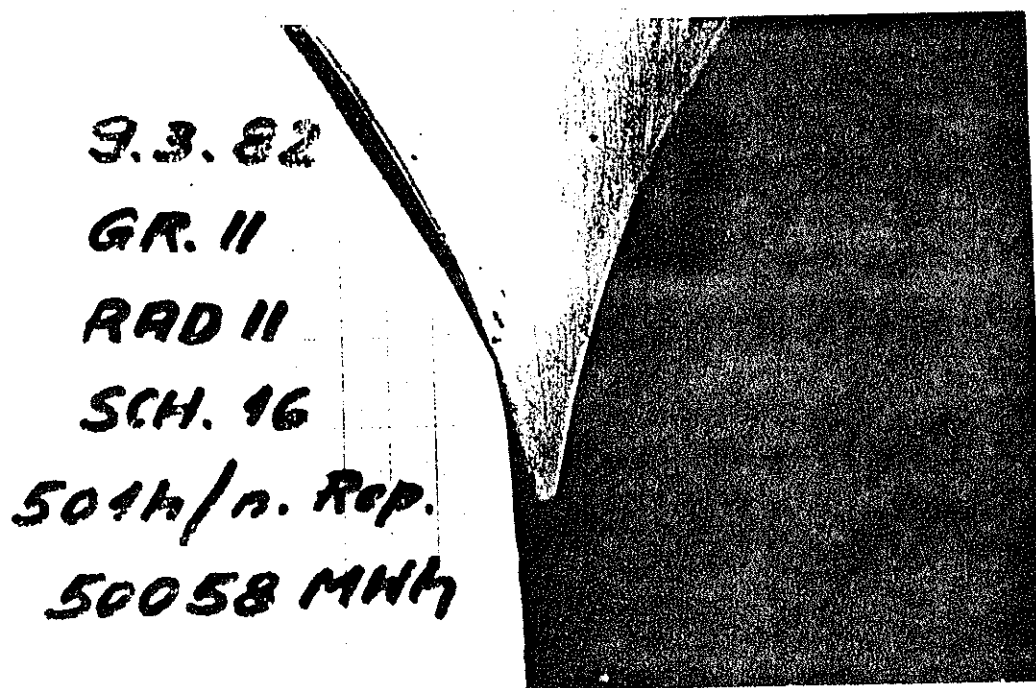
8. GREIN H., Anghrn R.; Lorenz M.; Bezinge A.  
Inspection Periods of Pelton Runners  
Zurich, Presented at the 12th  
IAHR-Symposium, Stirling, 1984.
9. GREIN H.; Schachenmann A.  
Abrasi3n en la Maquinaria de Centrales Hidroel3ctricas  
Zurich, Revista T3cnica Mec3nica Sulzer Escher Wyss (F3brica  
de Turbinas), 1992.
10. GREIN H.; Holler H. K.  
Resumen de Conferencias. M3quinas Hidr3ulicas  
Am3rica Latina, noviembre/diciembre 1981
11. Groupe D'3tude Cahier des Charges Hidr3uliques.  
Specification for Inspection of stell Castings fon Hydraulic  
Machines  
Edition 2  
Francia, 1979
12. PFLEIDERER, Carl P.; Petermann, Hartwing  
Maquinas de Fluxo  
Brasil, Rio de Janeiro, 1979
13. RODRIGUEZ, Camilo B.  
M3quinas Hidr3ulicas. Tomos I y II  
Argentina, Centro de Estudiantes de Ingenier3a de la Plata  
(C.E.I.L.P.), 1986.

## ANEXOS

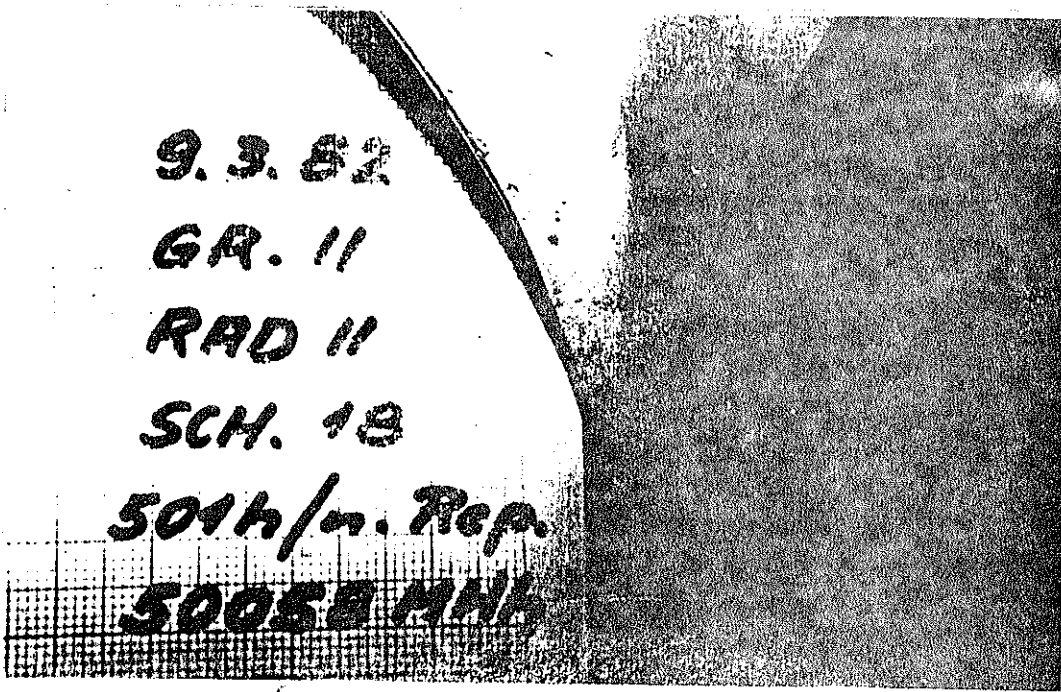
## ANEXO A

Se ha dicho que para conseguir un perfil con un alto coeficiente de presión, que sea insensible a la cavitación, es necesario hacer algunos ensayos en el cambio de forma y tamaño de los perfiles. Estos cambios se deben a que la casa fabricante diseña los rodetes para una altura neta determinada; pero, si ésta es menor o mayor a la de diseño, entonces sólo será necesario modificar los perfiles de los cangilones.

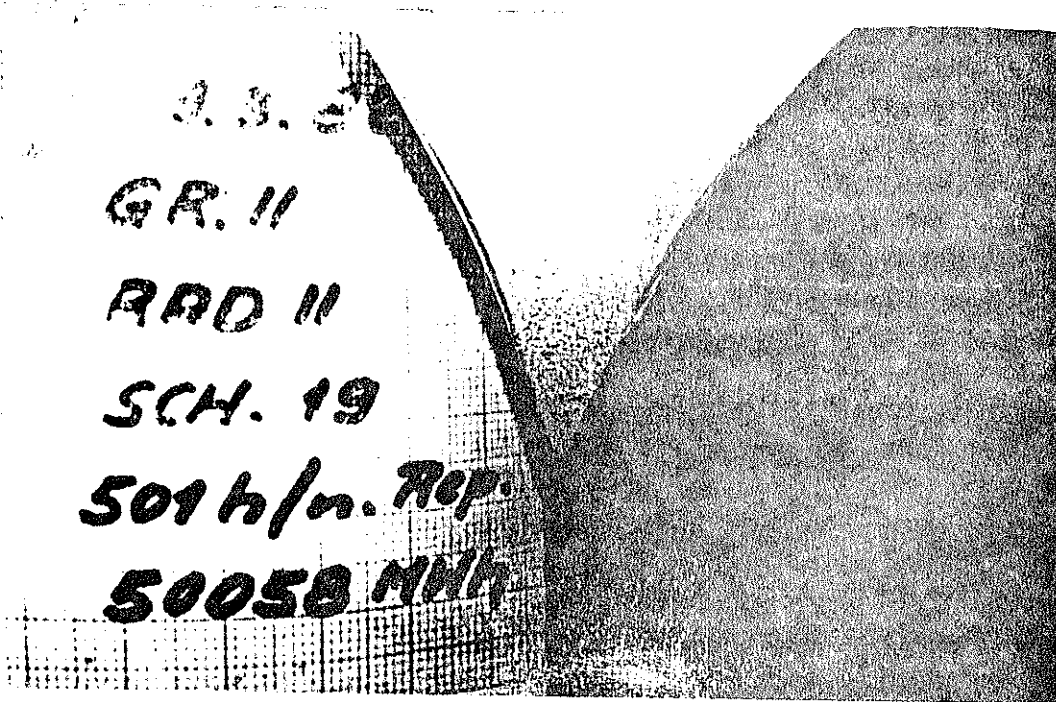
A continuación se presenta una vista fotográfica del ensayo en los perfiles de los cangilones Nos. 16, 18 y 19 de la Unidad 2 de la Planta Hidroeléctrica Aguacapa, con tres formas diferentes.



Perfil del cangilón No. 16  
501 horas después del cambio por soldadura y amolado



Perfil del cangilón No. 18  
501 horas después del cambio por soldadura y amolado



Perfil del cangilón No. 19  
501 horas, sin cambio en su forma original, solamente pulido.

Como puede apreciarse, el perfil del cangilón No. 19 es el más afectado durante las primeras 501 horas de servicio, por lo que fue necesario hacer la modificación respectiva.

### COMPROBACION DE LA PERDIDA DE MATERIAL POR CAVITACION 5444 HORAS DESPUES

La pérdida de material por cavitación fue determinada por el procedimiento de la determinación del volumen, por medio de la cual las puntas fueron llevadas a su forma original con una masa de materia plástica.

#### RUEDA PELTON No. 1

|  |             |
|--|-------------|
| Lectura del horómetro de la máquina:     | 10635 horas |
| Horas de trabajo desde el último cambio: | 5444 horas  |
| Lectura en el contador de energía:       | 122896 MWh. |
| Pérdida determinada por cavitación:      | 34 gramos.  |

#### RUEDA PELTON No. 3

|  |             |
|--|-------------|
| Lectura del horómetro de la máquina:     | 6757 horas  |
| Horas de trabajo desde el último cambio: | 4788 horas  |
| Lectura en el contador de energía:       | 122896 MWh. |
| Pérdida determinada por cavitación:      | 67 gramos.  |

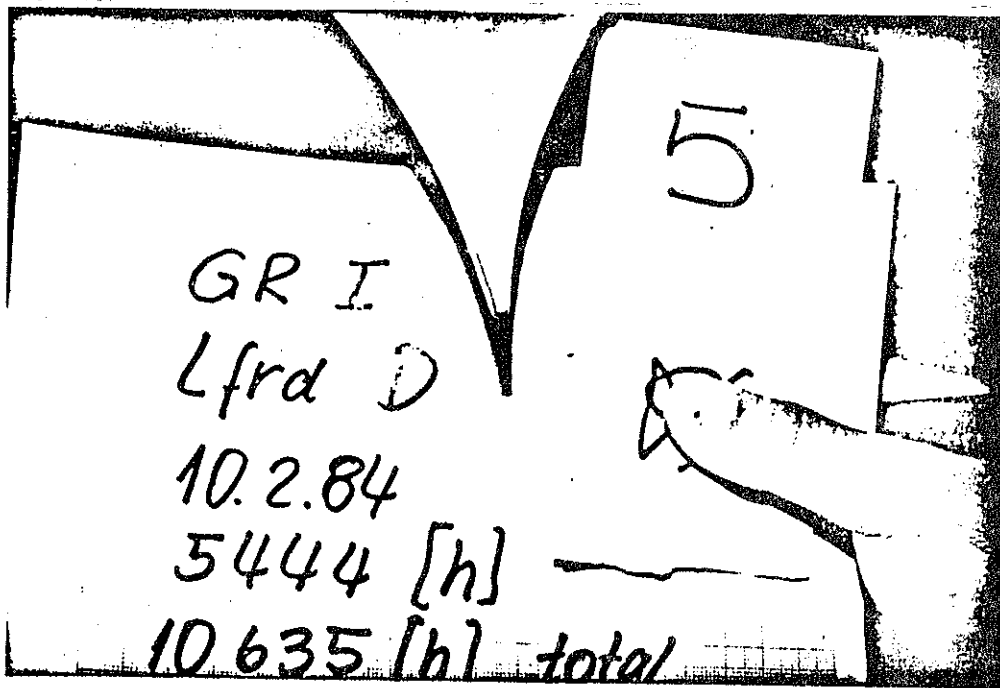
### COMENTARIO A LA PERDIDA DE MATERIAL POR CAVITACION

Con el cambio de las últimas puntas, referente al comportamiento de la cavitación, se consiguieron considerables progresos, pues, la pérdida comprobada es muy pequeña si se compara con la pérdida máxima garantizada de 5 Kg. en 8,000 horas o 2 años de servicio por rodete.

A continuación se incluyen las fotografías del perfil de los cangilones Nos. 5, 6 y 7, de la rueda Pelton No. 1.

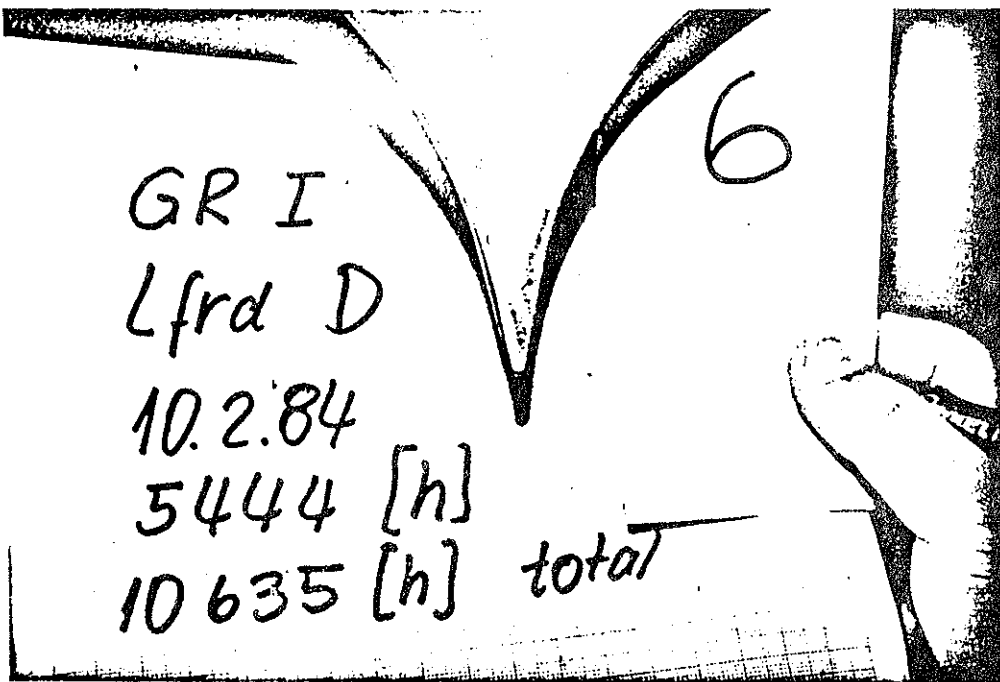
GR I  
Lfrd D  
10.2.84  
5444 [h]  
10.635 [h] total

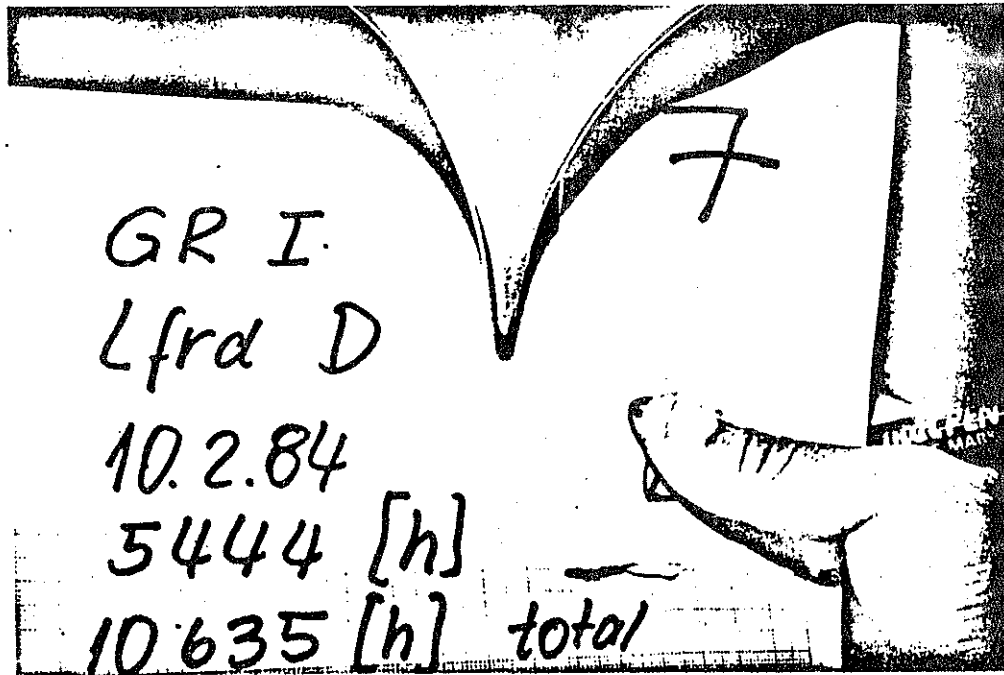
5

A hand-drawn diagram showing a V-shaped structure. The left side of the V is a vertical line. The right side is a vertical line with a horizontal line extending from its base to the right. A hand is drawn pointing towards the right side of the V. The number '5' is written above the right side of the V.

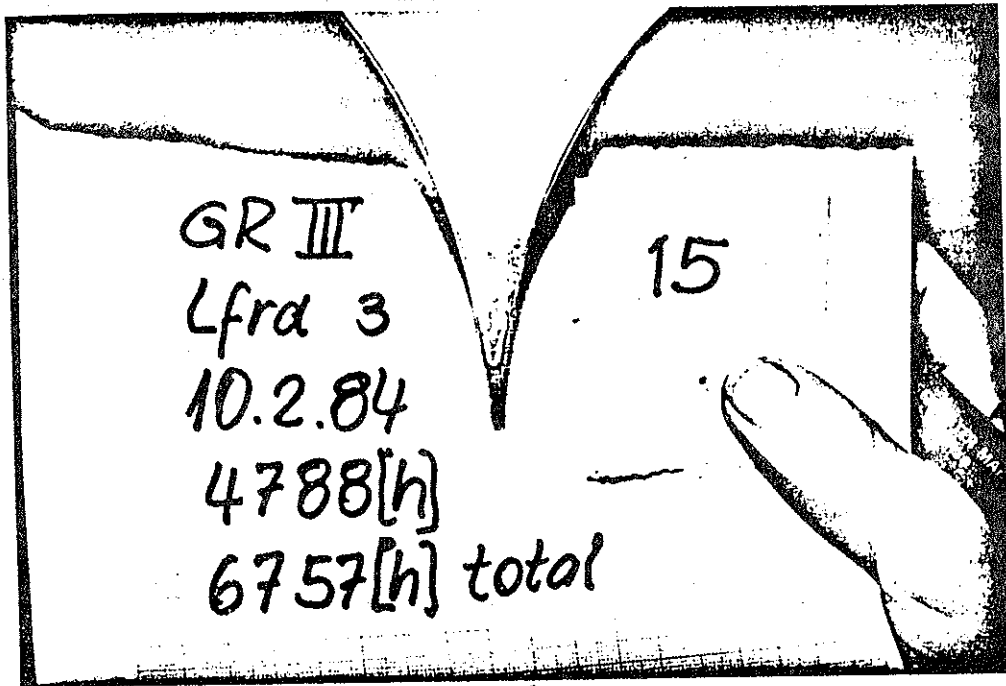
GR I  
Lfrd D  
10.2.84  
5444 [h]  
10.635 [h] total

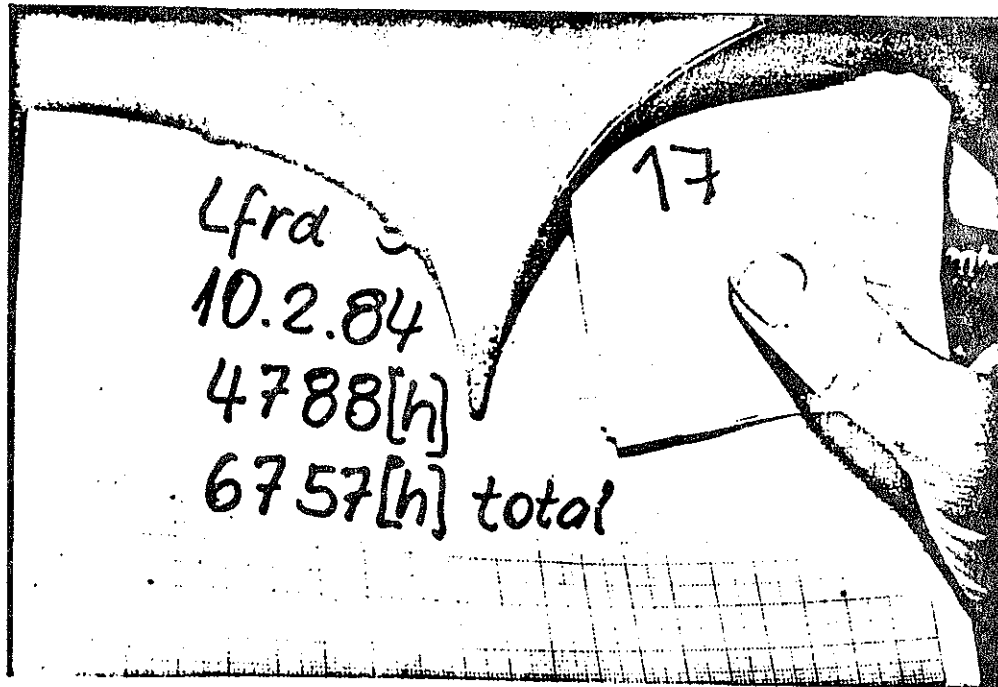
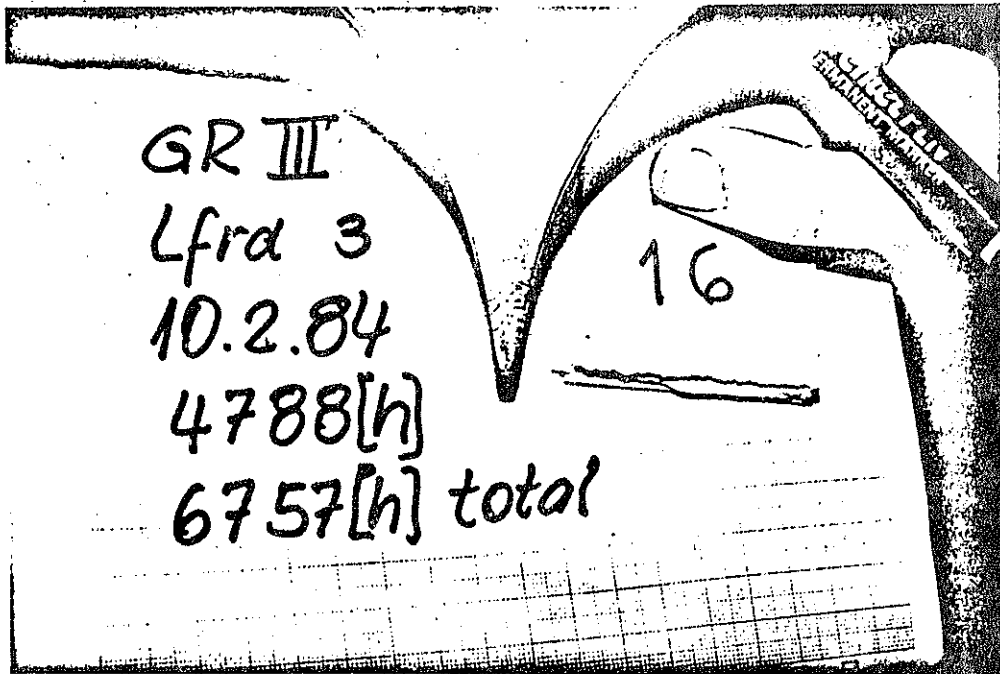
6

A hand-drawn diagram showing a V-shaped structure. The left side of the V is a vertical line. The right side is a vertical line with a horizontal line extending from its base to the right. A hand is drawn pointing towards the right side of the V. The number '6' is written above the right side of the V.



Adicionalmente, para la rueda Pelton No. 3, se incluyen las fotografías que corresponden al perfil de los cangilones Nos. 15, 16 y 17.







## ANEXO B

## CRAYONES DE TEMPERATURA THERMOCHROM

Estos permiten determinar la temperatura aproximada, con una diferencia mínima, en cuerpos calientes, de 65 a 670°C. Este tipo de crayones se utiliza en el campo de la soldadura, especialmente, cuando existe la necesidad de precalentar y controlar ciertas temperaturas, durante y después de la soldadura.

## INSTRUCCIONES DE USO

Basta con hacer una raya con el crayón seleccionado y si el cuerpo ha adquirido la temperatura deseada, el color de la raya cambia en segundos, de acuerdo con la identificación en la etiqueta.

Al efectuar la medición de temperatura, la marca hecha con el crayón no deberá exponerse directamente a la flama del soplete para evitar resultados erróneos. No es recomendable soldar por encima de la marca, debido a que podría, eventualmente, producir porosidades.

## Suministro

| No. de Parte a pedir: | Tipo de Envase                               | Contenido | Color Original | Color Resultante | Temperatura de Reacción                                |
|-----------------------|--|-----------|----------------|------------------|--|
| 2815/65               | Cajita de cartón                             | 12 piezas | gris           | azul verde       | 65°C 150°F   |
| 2815/75               | " "  | " "       | gris verde     | verde claro      | 75°C 165°F   |
| 2815/100              | " "  | " "       | rosa           | azul claro       | 100°C 210°F  |
| 2815/120              | " "  | " "       | ostión         | gris claro       | 120°C 250°F  |
| 2815/150              | " "  | " "       | amarillo       | violeta          | 150°C 300°F  |
| 2815/175              | " "  | " "       | violeta        | azul             | 175°C 350°F  |
| 2815/200              | " "  | " "       | azul           | negro            | 200°C 390°F  |
| 2815/220              | " "  | " "       | blanco         | ocre claro       | 220°C 430°F  |
| 2815/300              | " "  | " "       | verde turquesa | verde claro      | 300°C 570°F  |
| 2815/350              | " "  | " "       | ocre oscuro    | castaño rojizo   | 350°C 660°F  |
| 2815/375              | " "  | " "       | marrón         | gris oscuro      | 375°C 710°F  |
| 2815/420              | " "  | " "       | blanco         | amarillo         | 420°C 788°F  |
| 2815/450              | " "  | " "       | rosa           | gris oscuro      | 450°C 840°F  |
| 2815/500              | " "  | " "       | café           | gris oscuro      | 500°C 930°F  |
| 2815/600              | " "  | " "       | azul oscuro    | blanco           | 600°C 1100°F   |
| 2815/670              | " "  | " "       | verde oscuro   | blanco           | 670°C 1240°F   |
| 2814                  | Estuche plástico                             | 6 piezas  |                |                  | 75-100-120-150<br>175-200°C                            |
| 2817                  | Estuche metálico                             | 12 piezas |                |                  | 65-75-100-120<br>150-200-280-300-<br>350-450-500-600°C |
| 2820                  | Estuche metálico                             | 18 piezas |                |                  | de 65°C a 670°C  |
| 2850                  | Porta-crayón de aluminio de 150 mm. de largo |           |                |                  |  |

## ANEXO C

## TEMPERATURAS DE PRECALENTAMIENTO PARA DIFERENTES ACEROS

Las temperaturas indicadas en esta tabla representan los valores mínimos para cada material, por lo que se recomienda usar siempre la temperatura más alta de las cifras indicadas para el metal base y para el material de aporte.

La temperatura de precalentamiento para cada aleación está indicada en su descripción respectiva y dependerá del contenido de carbono y elementos de aleación en el metal base. Cuanto más alto el contenido de carbono, mayor debe ser la temperatura de precalentamiento.

| ACEROS                     | DESIGNACION                   | % CARBONO    | PRECALENTAMIENTO RECOMENDADO |
|----------------------------|-------------------------------|--------------|------------------------------|
| ACEROS AL CARBONO          | Aceros al Carbono             | Bajo 0,20    | Sobre 90°C                   |
|                            | Aceros al Carbono             | 0,20 - 0,30  | 90°C - 150°C                 |
|                            | Aceros al Carbono             | 0,30 - 0,45  | 150°C - 260°C                |
|                            | Aceros al Carbono             | 0,45 - 0,80  | 260°C - 420°C                |
| ACEROS CARBONO-MOLIBDENO   | Aceros Carbono-Molibdeno      | 0,10 - 0,20  | 150°C - 260°C                |
|                            | Aceros Carbono-Molibdeno      | 0,20 - 0,30  | 200°C - 320°C                |
|                            | Aceros Carbono-Molibdeno      | 0,30 - 0,35  | 260°C - 420°C                |
| ACEROS AL MANGANESO        | Aceros al Mn. Medio           | 0,20 - 0,25  | 150°C - 260°C                |
|                            | SAE T 1330                    | 0,30         | 200°C - 320°C                |
|                            | SAE T 1340                    | 0,40         | 260°C - 420°C                |
|                            | SAE T 1350                    | 0,50         | 320°C - 480°C                |
|                            | Ac. Mn. 12% (HADFIELD)        | 1,25         | No requiere                  |
| ACEROS DE ALTA RESISTENCIA | Acero Molibdeno-Manganeso     | 0,20         | 150°C - 260°C                |
|                            | Acero T1                      | 0,10 - 0,20  | 90°C - 200°C                 |
|                            | Aceros Alta Resistencia ARMCO | 0,12 Máx.    | Sobre 90°C                   |
|                            | Aceros Mayari R               | 0,12 Máx.    | Sobre 150°C                  |
|                            | Aceros DUR-CAP                | 0,25 Máx.    | 90°C - 200°C                 |
|                            | Aceros YOLOY                  | 0,05 - 0,35  | 90°C - 320°C                 |
|                            | Aceros Cr-Cu-Ni               | 0,12 Máx.    | 90°C - 200°C                 |
|                            | Aceros CROMO-MANGANESO        | 0,40         | 200°C - 320°C                |
| Aceros Hi                  | 0,12 Máx.                     | 90°C - 260°C |                              |

| ACEROS                          | DESIGNACION  | % CARBONO  | PRECALENTAMIENTO RECOMENDADO   |
|---------------------------------|--|--|--|
| ACEROS AL NIQUEL                | SAE 2015<br>SAE 2115<br>Acero Níquel 2 1/2 %<br>SAE 2315<br>SAE 2320<br>SAE 2330<br>SAE 2340   | 0,10-0,20<br>0,10-0,20<br>0,10-0,20<br>0,15<br>0,20<br>0,30<br>0,40                                  | Sobre 150°C<br>90°C-150°C<br>90°C-200°C<br>90°C-260°C<br>90°C-260°C<br>150°C-320°C<br>200°C-370°C  |
| ACEROS CROMO-NIQUEL             | SAE 3115<br>SAE 3125<br>SAE 3130<br>SAE 3140<br>SAE 3150<br>SAE 3215<br>SAE 3230<br>SAE 3240<br>SAE 3250<br>SAE 3315<br>SAE 3325<br>SAE 3435<br>SAE 3450       | 0,15<br>0,25<br>0,30<br>0,40<br>0,50<br>0,15<br>0,30<br>0,40<br>0,50<br>0,15<br>0,25<br>0,35<br>0,50 | 90°C-200°C<br>150°C-260°C<br>200°C-370°C<br>260°C-430°C<br>320°C-480°C<br>150°C-260°C<br>260°C-370°C<br>370°C-540°C<br>480°C-600°C<br>260°C-370°C<br>480°C-600°C<br>480°C-600°C<br>480°C-600°C |
| ACEROS AL MOLIBDENO             | SAE 4140<br>SAE 4340<br>SAE 4615<br>SAE 4630<br>SAE 4640<br>SAE 4820   | 0,40<br>0,40<br>0,15<br>0,30<br>0,40<br>0,20   | 320°C-430°C<br>370°C-480°C<br>200°C-320°C<br>260°C-370°C<br>320°C-430°C<br>320°C-430°C   |
| ACEROS CROMO-MOLIBDENOS         | Aceros 2% Cr-1/2% Mo<br>Aceros 2% Cr-1/2% Mo<br>Aceros 2% Cr-1% Mo<br>Aceros 2% Cr-1% Mo<br>Aceros 5% Cr-1/2% Mo<br>Aceros 5% Cr-1/2% Mo<br>Aceros 8% Cr-1% Mo | Sobre 0,15<br>0,15-0,25<br>Sobre 0,15<br>0,15-0,25<br>Sobre 0,15<br>0,15-0,25<br>0,15 Máx.           | 200°C-320°C<br>260°C-430°C<br>260°C-370°C<br>320°C-430°C<br>260°C-430°C<br>320°C-480°C<br>320°C-480°C  |
| ACEROS AL CROMO                 | 12-14% Cr tipo 410<br>16-18% Cr tipo 430<br>23-30% Cr tipo 446   | 0,10<br>0,10<br>0,10   | 150°C-260°C ✓<br>150°C-260°C<br>150°C-260°C  |
| ACEROS INOXIDABLES CROMO-NIQUEL | 18% Cr-8% Ni tipo 304<br>25-12 tipo 309<br>25-20 tipo 310<br>18-8 Cb tipo 347<br>18-8 Mo tipo 316<br>18-8 Mo tipo 317  | 0,07<br>0,07<br>0,10<br>0,07<br>0,07<br>0,07   | Estos aceros no requieren de precalentamiento  |

