

2010

# ***"Mecanismos de Falla de Turbinas de Vapor"***

**Residencia Profesional**

**Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez**

**CIATEQ**

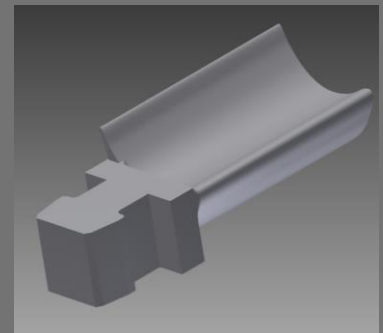
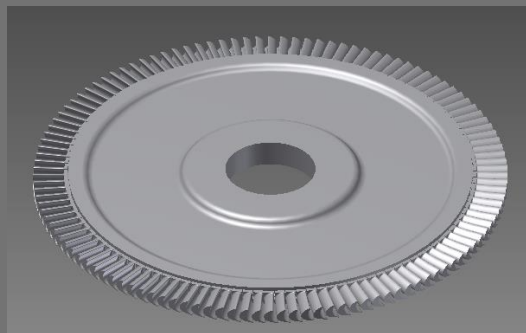
**Sandra Paola Ruiz Gutiérrez**

**No de Control 06270450**

**Ingeniería Mecánica**

**Periodo: Agosto-Diciembre 2010**

**Tuxtla Gutiérrez Chiapas a 21 de Diciembre de 2010**





## ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	13
2	JUSTIFICACIÓN.....	14
3	OBJETIVOS.....	15
4	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA.....	16
4.1	ORGANIGRAMA DE LA EMPRESA .....	17
4.2	HISTORIA.....	18
4.3	VISIÓN (2005-2015) .....	19
4.4	CLIENTES.....	19
4.4.1	Hidrocarburos .....	19
4.4.2	Comunicaciones y Transportes .....	19
4.4.3	Automotriz y Autopartes .....	20
4.4.4	Maquinaria y Equipo .....	21
4.4.5	Electricidad.....	22
4.4.6	Agua .....	22
4.4.7	Aeronáutica .....	22
4.4.8	Alimenticia .....	22
4.5	CERTIFICACIONES Y RECONOCIMIENTOS.....	24
4.5.1	Certificado ISO-9001:2008.....	24
4.5.2	Acreditaciones EMA .....	25
4.5.3	Premio Nacional de Tecnología.....	26
4.6	ALIANZAS .....	27
4.6.1	Instituciones Educativas Nacionales.....	27
4.6.2	Internacionales .....	27
4.6.3	Especialistas .....	27



4.6.4	Centros de Investigación .....	28
4.6.5	Empresas .....	28
4.7	ÁREA DE TRABAJO.....	30
4.7.1	Unidad El Marqués, Qro.....	30
4.7.2	Gerencia de Turbomaquinaria .....	31
4.7.3	Grupos de Trabajo de la Gerencia de Turbomaquinaria.....	31
4.7.4	Grupo de Trabajo de Rehabilitación y Diseño de Turbopartes .....	31
4.7.5	Línea de Trabajo: Análisis de falla .....	32
5	PROBLEMAS A RESOLVER .....	33
6	FUNDAMENTO TEÓRICO .....	34
6.1	CREEP.....	35
6.2	FATIGA .....	39
6.2.1	Fatiga por altos ciclos (HCF) .....	39
6.2.2	Fatiga por bajos ciclos (LCF).....	43
6.2.3	Fatiga con corrosión .....	44
6.3	FRAGILIZACIÓN POR TEMPLADO .....	47
6.4	EROSIÓN .....	48
6.4.1	Lavado por erosión (Washing Erosion) .....	49
6.4.2	Daño por impacto de partículas sólidas .....	49
6.5	CORROSIÓN .....	52
6.5.1	Calidad del vapor .....	52
6.5.2	Corrosión bajo esfuerzos (Stress Corrosion Cracking, SCC).....	57
6.5.3	Corrosión por desgaste .....	62
7	PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS.....	64
7.1	ANTECEDENTES .....	64
7.2	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA.....	65



7.3	INSPECCIÓN VISUAL DISCO 5 .....	71
7.4	ANÁLISIS QUÍMICO DISCO 5 .....	73
7.5	ANÁLISIS METALOGRÁFICO DISCO 5.....	73
7.6	ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) DISCO 5.....	74
7.7	MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DISCO 5.....	76
7.8	INSPECCIÓN VISUAL DISCO 4 .....	76
7.9	ANÁLISIS QUÍMICO DISCO 4 .....	78
7.10	ANÁLISIS METALOGRÁFICO DISCO 4.....	78
7.11	ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) DISCO 4.....	79
7.12	MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DISCO 4.....	81
7.13	SIMULACIÓN DE LA RAÍZ DEL ÁLABE Y LA GUÍA DEL SOPORTE A TRAVÉS DEL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO.....	81
8	RESULTADOS.....	84
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	91
10	BIBLIOGRAFÍA .....	93
11	ANEXO 1 .....	94
11.1	INSPECCIÓN VISUAL DEL DISCO 5.....	94
12	ANEXO 2 .....	97
12.1	ANÁLISIS QUÍMICO DEL DISCO 5.....	97
13	ANEXO 3 .....	99
13.1	INSPECCIÓN METALOGRÁFICA DEL DISCO 5 .....	99
14	ANEXO 4 .....	103
14.1	INSPECCIÓN POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DEL DISCO 5 .....	103
15	ANEXO 5 .....	109
15.1	MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL DISCO 5 .....	109
16	ANEXO 6 .....	112



16.1	INSPECCIÓN VISUAL DEL DISCO 4 .....	112
17	ANEXO 7 .....	115
17.1	ANÁLISIS QUÍMICO DEL DISCO 4.....	115
18	ANEXO 8 .....	117
18.1	INSPECCIÓN METALGRÁFICA DEL DISCO 4 .....	117
19	ANEXO 9 .....	120
19.1	INSPECCIÓN POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DEL DISCO 4 .....	120
20	ANEXO 10 .....	124
20.1	MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL DISCO 4 .....	124



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 CIATEQ Unidad Bernardo Quintana.....	16
Figura 2 Nave E de la Unidad Bernardo Quintana .....	17
Figura 3 Organigrama de CIATEQ .....	17
Figura 4 Parte interna de la Nave E.....	19
Figura 5 Organigrama de la Unidad El Marqués.....	30
Figura 6 Método de inspección de falla .....	33
Figura 7 Pasos para el análisis de falla .....	34
Figura 8 Fases del creep .....	36
Figura 9 Deflexión del diafragma en el diámetro interior sobre la junta horizontal.....	37
Figura 10 Deformación por creep en la superficie interior de la carcasa .....	38
Figura 11 Fractura por fatiga.....	39
Figura 12 Fractura de fatiga por altos ciclos sobre la superficie de la raíz de un álabe.....	40
Figura 13 Grieta de fatiga por bajos ciclos sobre una carcasa de alta presión .....	44
Figura 14 Curva S-N, Corrosión-Fatiga .....	45
Figura 15 Porción de un disco con grietas por fatiga con corrosión .....	46
Figura 16 Erosión por impacto de humedad .....	48
Figura 17 Pérdida de material en la pared exterior causado por el flujo de agua .....	49
Figura 18 Daño ligero generado por partículas sólidas .....	50
Figura 19. Daño medio generado por partículas sólidas .....	51
Figura 20 Daño intenso generado por partículas sólidas.....	51
Figura 21 Diagrama de Mollier, muestra las regiones, o condiciones donde los iones corrosivos salen en solución desde el vapor .....	54
Figura 22 Resumen de falla en álabes, se observa que las fallas predominan en las regiones donde la humedad está presente.....	54
Figura 23 Picadura de corrosión de la rueda en una etapa.....	55



Figura 24(a) Corrosión en la raíz del álabe. (b) Se observa la forma de dicha raíz..... 56

Figura 25 Picaduras por corrosión en el extremo del rotor..... 56

Figura 26 Mecanismo de ruptura de la película de óxido por SCC ..... 58

Figura 27 Grietas por SCC sobre una sección de la rueda..... 59

Figura 28 Sección transversal de un componente que ha fallado, debido a grietas intergranulares por SCC ..... 59

Figura 29 Grieta transgranular en la raíz de un álabe ..... 60

Figura 30 Iniciación de una grieta en la raíz de un álabe..... 61

Figura 31 Álabes con un alargamiento en el orificio..... 63

Figura 32 Rotor de la turbina de vapor ..... 65

Figura 33 Engrane para sensor de velocidad con arrastre en dientes y fuerte deformación 65

Figura 34 Zona de sellos laberínticos de ambos lados con crestas deformadas por arrastre 66

Figura 35 Disco del primer paso con arrastre en el borde y bandas levantadas con poco ajuste ..... 66

Figura 36 Cuñero y barreno del perno de seguro no presenta daños aparentes..... 66

Figura 37 Fisura saliendo desde el cuñero de aproximadamente 2" de largo ..... 67

Figura 38 Fisuras sobre el ancho del cuñero y salientes del mismo..... 67

Figura 39 Fisuras en bandas y en el barreno del perno de seguro ..... 68

Figura 40 Fisura saliendo del cuñero ..... 68

Figura 41 Sección de álabes desprendida por fractura ..... 68

Figura 42 Detalle de la fractura en el disco ..... 69

Figura 43 Fisuras a lo ancho del cuñero y en los barrenos de equilibrio..... 69

Figura 44 Fisuras en barrenos de equilibrio ..... 69

Figura 45 Chumaceras radiales, lado libre con fuerte arrastre ..... 70

Figura 46 Chumaceras radiales, lado cople con desgaste por arrastre..... 70

Figura 47 Chumaceras axiales con rayas por arrastre ..... 71



Figura 48 Marcas de un objeto metálico deformado fue encontrado en la muestra ..... 72

Figura 49 Cara de los álabes, se observa la existencia de deformación plástica por talladura ..... 72

Figura 50 Tetones de los álabes existentes, se puede observar uno de ellos más elevado y una deformación existente..... 73

Figura 51 Superficie de fractura en el borde del barreno, se observa daño mecánico..... 75

Figura 52 Superficie de fractura en el borde del barreno ..... 75

Figura 53 Barreno del disco de la turbina en la parte contraria de la fractura, se observa la existencia de un desfase entre el barreno y el avellanado, además de una deformación plástica en la parte superior del barreno..... 77

Figura 54 Micrografía a 100X muestra la microestructura del disco 4 en la cercanía de la grieta del radio de la canaleta. Se pueden observar carburos precipitados y decohesión entre los granos austeníticos..... 79

Figura 55 La imagen MEB muestra el origen de la fractura en el barreno. Se puede observar un patrón de tipo cuasiclivaje en el origen de la fractura y una inclusión no metálica ..... 80

Figura 56 La imagen MEB muestra el origen de la fractura en el barreno. Se puede observar un patrón de tipo cuasiclivaje en el origen de la fractura y una inclusión no metálica, además del lugar donde se llevó a cabo el microanálisis EDS 1..... 80

Figura 57 Distribución de la fuerza en los elementos ..... 82

Figura 58 Reacción de la pieza a la fuerza aplicada ..... 82

Figura 59 Distribución de esfuerzos..... 83

Figura 60 Distribución de esfuerzos en la zona crítica ..... 83

Figura 61 Muestra del disco de la turbina en preparación para el laboratorio ..... 95

Figura 62 Se observa que el origen de la grieta se encuentra en el barreno ..... 95

Figura 63 Se muestra el fin de la fractura. Se observa desgarramiento de la pestaña de la guía de los álabes con el disco..... 95

Figura 64 Superficie de la fractura primaria. Se observa una capa de productos de corrosión, el origen de la grieta en el barreno y deformación plástica en el fondo del mismo..... 96

Figura 65 Superficie de la fractura primaria y secundaria. Se observa que el origen de ambas es el barreno y la capa de productos de corrosión que cubre la superficie de fractura primaria ..... 96





Figura 66 Cara de los álabes, se observa la existencia de deformación plástica por talladura ..... 96

Figura 67 Se muestra a una escala 100X la superficie para análisis metalográfico antes de ser atacada. Se observa un alto nivel de inclusiones no metálicas ..... 100

Figura 68 Se muestra a una escala 500X la región de inclusiones no metálicas, donde se pueden ver huecos generados a partir de ellas ..... 100

Figura 69 La imagen muestra a 200X la superficie para análisis metalográfico en la superficie de fractura. Se observan grietas secundarias existentes dentro del material y otra que crece a partir de la fractura ..... 101

Figura 70 La micrografía muestra a 200X la microestructura cercana a la superficie de fractura. Se observa la existencia de fracturas secundarias y una microestructura de martensita revenida ..... 101

Figura 71 La micrografía muestra a 500X la microestructura del material del disco de la turbina. Se observan carburos precipitados formando cadena en el límite de grano austenítico ..... 102

Figura 72 La micrografía muestra a 500X la microestructura en una de las grietas secundarias. Se observa en una zona la presencia de una inclusión no metálica ..... 102

Figura 73 La imagen MEB muestra la superficie de fractura en el borde del barreno. Se puede observar la existencia de inclusiones no metálicas y de grietas ..... 104

Figura 74 La imagen MEB muestra la superficie de fractura en el borde del barreno. Se puede observar un patrón de fractura intergranular ..... 104

Figura 75 La imagen MEB muestra la superficie de fractura en el borde del barreno. Se puede observar un patrón de fractura intergranular y el lugar donde fue llevado a cabo el análisis EDX 1 ..... 105

Figura 76 La imagen muestra el resultado del microanálisis EDX 1 ..... 105

Figura 77 La imagen MEB muestra la superficie de fractura en el borde del barreno. Se puede observar un patrón de fractura intergranular y el lugar donde fue llevado a cabo el análisis EDX 2 ..... 106

Figura 78 La imagen muestra el resultado del microanálisis EDX 2 ..... 106

Figura 79 La imagen MEB muestra una de las grietas secundarias, se puede observar la existencia de una inclusión no metálica y el lugar donde fue hecho el microanálisis EDX 3 ..... 107

Figura 80 La imagen muestra el resultado del microanálisis EDX 3 ..... 107



Figura 81 La imagen muestra una inclusión no metálica encontrada dentro de una de las grietas. Se observa el lugar donde fue realizado el microanálisis EDX 4 .....108

Figura 82 La imagen muestra el resultado del microanálisis EDX 4 .....108

Figura 83 La imagen MEB muestra la superficie de fractura de la probeta para ensayo mecánico de tensión. Se observa una zona fractura frágil y otra de fractura dúctil .....110

Figura 84 La imagen muestra la superficie de la fractura en la zona fragilizada. Se observa un patrón de fractura intergranular e inclusiones no metálicas .....110

Figura 85 Muestra del disco de la turbina en preparación para el laboratorio .....113

Figura 86 Vista superior del disco .....113

Figura 87 Se observan dos fracturas con origen en el barreno, además de una deformación plástica en el mismo .....113

Figura 88 Se observa daño mecánico en la superficie de la canaleta .....114

Figura 89 Superficie de fractura del disco, se observa que el origen de la grieta se localiza en el barreno .....114

Figura 90 La imagen muestra a 10X el origen de las fracturas localizadas en el barreno ..114

Figura 91 La micrografía muestra a 200X la microestructura del material del disco, se observa la presencia de bainita, austenita retenida e inclusiones no metálicas.....118

Figura 92 La micrografía muestra a 1000X la microestructura del disco, además se pueden observar carburos precipitados en los límites de grano austenítico .....118

Figura 93 La micrografía muestra a 500X una grieta de tipo frágil en la cercanía de la grieta del radio de la canaleta .....119

Figura 94 La micrografía muestra a 1000X la microestructura del disco en la cercanía del radio de la canaleta, se observan carburos precipitados y decohesión entre los granos austeníticos .....119

Figura 95 La imagen MEB muestra el origen de la fractura en el barreno, se observa una grieta secundaria debajo de la superficie de fractura .....121

Figura 96 La imagen MEB muestra el origen de la fractura en el barreno, se observa un patrón de tipo cuasiclivaje en el origen de la fractura y una inclusión no metálica .....121

Figura 97 La imagen MEB muestra el origen de la fractura en el barreno, se observa un patrón de tipo cuasiclivaje en el origen de la fractura y una inclusión no metálica, además del lugar donde se llevó a cabo el microanálisis EDS 1 .....122



Figura 98 La imagen muestra el resultado del microanálisis EDS 1 .....122

Figura 99 La imagen MEB muestra el lado contrario al origen de la fractura en el barreno. Se observa un patrón de tipo cuasiclivaje en el origen de la fractura y una zona con patrón intergranular, además del lugar donde fue realizado el microanálisis EDS 2 .....123

Figura 100 La imagen muestra el resultado del microanálisis EDS 2 .....123

Figura 101 La imagen MEB muestra la superficie de fractura de la probeta del ensayo a la tensión del disco.....125

Figura 102 La imagen MEB muestra la superficie de fractura. Se observan inclusiones no metálicas, patrón de hoyuelos de fractura, regiones de clivaje .....125



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Apariencia de la fractura según el efecto de la carga .....	41
Tabla 2 Fuentes de vibración .....	42
Tabla 3 Composición del agua .....	52
Tabla 4 Composición del agua .....	64
Tabla 5 Análisis químico del disco 5 .....	98
Tabla 6 Propiedades mecánicas del disco 5 .....	111
Tabla 7 Análisis químico del disco 4 .....	116
Tabla 8 Propiedades mecánicas del disco cuatro .....	126



## 1 INTRODUCCIÓN

El análisis de falla es un proceso crítico en la determinación de las causas físicas de los problemas. El proceso es complejo, ya que se basa en muchas disciplinas y técnicas diferentes, como la observación, inspección y técnicas de laboratorio. Uno de los factores clave en la correcta realización de un análisis de la falla es mantener una mente abierta al examinar y analizar las pruebas para tener una perspectiva clara e imparcial de la falla. En determinadas circunstancias se requiere la colaboración con expertos en otras disciplinas, para integrar el análisis de las pruebas con una comprensión cuantitativa de los factores que intervienen como es el diseño, fabricación y servicio de la historia del producto o sistema averiado.

En este estudio se presenta brevemente el concepto de análisis de falla y su función como una herramienta de ingeniería en general para mejorar la calidad del producto y la prevención del fracaso. La disciplina de análisis de fallas ha evolucionado y madurado, ya que se ha empleado y formalizado como un medio para la prevención de daños.

Como un caso ilustrativo se realizará un estudio en una turbina de vapor la cual se adquirió y se puso en operación a finales del 2008 acoplada a un generador eléctrico. Este tren de turbogeneración producía alrededor de 6.5 MW pero después de aproximadamente un año y tres meses de operación el tren presentó una falla mayor lo cual impidió la continuación de la generación eléctrica.

Al hacer la revisión pertinente se observó que la turbina de vapor tenía varias fracturas visibles en diversos discos del rotor, principalmente en la quinta etapa a la altura del candado de seguridad de los álabes, donde presentó desprendimiento de material, por lo que se realizó un análisis de falla para encontrar la causa-raíz de la fractura haciendo uso de diversas tecnologías como análisis metalográfico, fractográfico, químico, microscopía electrónica de barrido y por elemento finito.

Los resultados obtenidos son presentados en este trabajo con el objetivo de transmitir la experiencia obtenida para intentar evitar que se repita este tipo de fallas en elementos de turbomaquinaria.



## 2 JUSTIFICACIÓN

Durante décadas las maquinas rotativas se han establecido dentro de la industria como parte fundamental para la generación de trabajo mecánico, tal generación se debe a la energía de los fluidos que es depositada en el equipo, produciendo algún giro o revolución en alguna turboparte de la máquina dando como resultado algún trabajo mecánico.

Específicamente las turbinas de vapor se han venido colocado como una de las maquinas principales para la generación de trabajo mecánico dentro de la industria, lo cual se debe al gran aprovechamiento que se tiene de la energía térmica del vapor para transformarla en energía cinética útil para el accionamiento de equipos mecánicos tales como compresores, bombas, generadores eléctricos, entre otros. El fluido de trabajo es el vapor de agua, el cual resulta económico y fácil de manejar. En comparación con otras máquinas (alternativas a vapor, de combustión interna) ofrecen una mayor relación potencia/tamaño. Por lo cual resulta crucial que las tareas de mantenimiento de este tipo de equipos se efectúen con rapidez para reanudar lo antes posible su operación, ya que el tiempo que se encuentren fuera de servicio se verá reflejado en pérdidas económicas significativas para la empresa.

Cuando una falla se presenta en algún equipo dentro de un tren de trabajo, afectará directamente las ganancias y costos de la empresa, así que la razón principal de los análisis de fallas siempre será tener los equipos en su óptimo funcionamiento para evitar cualquier daño que pare la producción o proceso al cual se encuentra acoplado.

Para poder realizar un análisis de falla efectivo, se requiere un conocimiento de la operación del equipo, condiciones de trabajo, fluido que maneja, etc. ya que esto nos ayudará a establecer las primeras hipótesis sobre la posible raíz del daño.



### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GENERAL.

Analizar una turbina de vapor y determinar el o los mecanismos responsables de la falla del rotor; además de establecer las causas principales que provocaron su desarrollo y dar a conocer recomendaciones para prevenir futuras fallas de la misma índole.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Analizar las fallas más comunes en turbinas de vapor.
- b. Establecer un proceso de inspección de falla en maquinaria rotativa.
- c. Establecer fallas primarias y secundarias en la turbina de vapor de estudio.
- d. Dar recomendaciones para aumentar la confiabilidad, disponibilidad y vida útil del equipo respectivo.



#### 4 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA



**Figura 1 CIATEQ Unidad Bernardo Quintana**

CIATEQ, A.C., Centro de Tecnología Avanzada

Es un centro que ofrece soluciones integrales, innovadoras, prácticas y oportunas a la industria manufacturera, petrolera, aeroportuaria y a la relacionada con el manejo y distribución de agua, integrando especialidades tecnológicas de mecatrónica, sistemas de medición, monitoreo y control automático, desarrollo de software y manufactura avanzada.

Como Centro Público de Investigación coordinado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, (CONACYT) la Misión integra la responsabilidad por formar recursos humanos de alto nivel relacionados con nuestras especialidades tecnológicas así como generar conocimiento científico a través de la investigación aplicada.





Figura 2 Nave E de la Unidad Bernardo Quintana

#### 4.1 ORGANIGRAMA DE LA EMPRESA

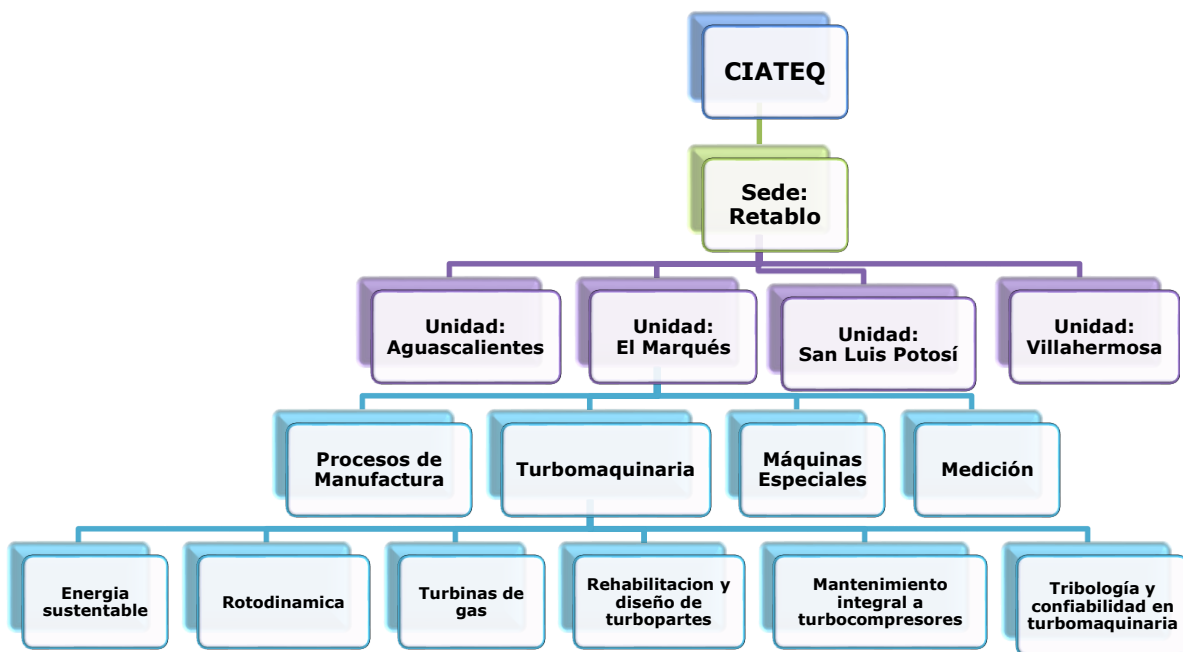


Figura 3 Organigrama de CIATEQ



## 4.2 HISTORIA

Para Querétaro la época de los años setenta marcó el crecimiento industrial de la ciudad. El área metalmeccánica se convirtió en un sector preponderante con la presencia de dos grandes grupos industriales, ICA y SPICER, quienes tuvieron la iniciativa de instalar un centro para apoyar a la industria de Querétaro y la región. Esta iniciativa fue recibida por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y Laboratorios Nacionales de Fomento Industrial (LANFI), quienes evaluaron las necesidades de tener un soporte tecnológico para la industria de la región, iniciando así las gestiones con el gobierno estatal para el apoyo en la creación de uno de los denominados CRIAT (Centros Regionales de Investigación y Asistencia Técnica) orientado al área metal-mecánica, específicamente en diseño y manufactura.

Finalmente en el año de 1978, CONACYT procede a estructurar los lineamientos bajo los cuales se constituiría el Centro. Siendo así que el 9 de noviembre de 1978 se constituyó el Centro de Investigación y Asistencia Técnica del Estado de Querétaro, A.C. (CIATEQ) con la participación del gobierno federal representado por CONACYT y LANFI, el gobierno estatal de Querétaro y por industriales del estado encabezados por directivos de Grupo ICA y Grupo SPICER.

A partir de la constitución de CIATEQ, los objetivos que se establecieron fueron los siguientes: proporcionar asesoría técnica para el establecimiento de nuevas empresas; promoción industrial y actividades de capacitación técnica de personal; proporcionar servicios de asistencia técnica en cuanto al control integral de la calidad de materiales y productos manufacturados; brindar asesoría en aspectos técnicos de diseño, métodos de manufactura, maquinaria y procesos, organización y control de la producción; realizar trabajos de investigación aplicada, innovación y desarrollo tecnológico.



**Figura 4 Parte interna de la Nave E**

"CIATEQ es un Centro Público de Investigación Tecnológica que mediante el diseño y desarrollo de productos, procesos, sistemas y formación de recursos humanos, crea valor para sus clientes y asociados".

### 4.3 VISIÓN (2005-2015)

"CIATEQ se ve como un Centro de Vanguardia en desarrollo tecnológico reconocido por la creación y fortalecimiento de empresas donde su personal se desarrolle con profesionalismo y trascienda en la sociedad".

### 4.4 CLIENTES

#### 4.4.1 Hidrocarburos

- PEMEX Refinación
- PEMEX Gas y Petroquímica Básica
- PEMEX Petroquímica
- Empresa Nacional del Petróleo de Chile (ENAP)







#### 4.4.2 Comunicaciones y Transportes

- Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA)



- Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE)
- Televisión Azteca

#### 4.4.3 Automotriz y Autopartes

- Cooper – Stándar Automotive Sealing de México, S.A. de C.V.
- Delphi Automotive Systems, S.A.
- Eaton Automotive, S. de R.L.
- Frenados Mexicanos, S.A. de C.V.
- General Motors, S.A. de C.V.
- Harada Industrias de México, S.A. de C.V.
- Honda de México, S.A. de C.V.
- Hutchinson Autopartes de México, S.A. de C.V.
- Industria de Asiento Superior. S.A. de C.V.
- Industrias Michelin, S.A. de C.V.
- Irizar México, S.A. de C.V.
- Johann A. Krause de México, S.A. de C.V.
- Meridian Automotive Systems de México, S. de R.L.
- Metaldyne, S.A.
- Moto Diesel Mexicana, S.A.
- Nissan México, S.A. de C.V.
- Pistones Moresa, S.A. de C.V.
- Sealed Power, S.A. de C.V.
- Valeo Termico, S.A. de C.V.





- Valeo Sistemas Eléctricos, S.A. de C.V.
- Vam México, S.A. de C.V.



#### 4.4.4 Maquinaria y Equipo

- Arvin de México, S.A de C.V.
- Alambrados y Circuitos Eléctricos
- Alfa Hi-Lex, S.A. de C.V.
- Bombardier Transportation, S.A. de C.V.
- Condumex, S.A. de C.V.
- Conducel, S.A. de C.V.
- Cydsa, S.A. de C.V.
- Geométrica de México, S.A.
- Girsá Corporativo, S.A. de C.V.
- Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM).
- Hilex Mexicana, S.A. de C.V.
- Helvex, S.A. de C.V.
- Mabe, S.A. de C.V.
- Maquinados y Pilotos Saldaña, S.A. de C.V.
- J.M. Romo, S.A. de C.V.
- Kosa, S.A. de C.V.
- Secretaría de Marina (SEMAR).
- Servicios Selther, S.A. de C.V.
- Siemens, VDO, S.A. de C.V.
- Servicios Selther, S.A. de C.V.





#### **4.4.5 Electricidad**

- Comisión Federal de Electricidad (CFE)
- Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales (LAPEM)

#### **4.4.6 Agua**

- Comisión Estatal de Aguas de Querétaro (CEA)
- Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Yucatán (JAPAY)
- Sistema de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Atizapán (SAPASA)
- Agua y Saneamiento de Toluca (AyST)
- OOAPAS Venustiano Carranza, Michoacán.
- Junta municipal de agua potable y alcantarillado de Celaya, (JUMAPA)
- Servicios de Agua Potable, Drenaje y Alcantarillado (SEAPAL) de Puerto Vallarta
- Servicios de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Matehuala (SAPSAM)

#### **4.4.7 Aeronáutica**

- ITR Turborreactores
- GE IQ (CIAT )

#### **4.4.8 Alimenticia**

- Carnes Selectas Tangamanga, S.A. de C.V.
- Compañía Cervecera del Trópico, S.A. de C.V.
- Consejo para el Fomento de la Calidad de



## la Leche

- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales
- Deshidratadora Aguascalientes
- Embotelladora Las Trojes, S.A. de C.V.
- Empacadora de Carnes Fresnillo, S.A. de C.V.
- Frigorizados La Huerta, S.A. DEC.V.
- Industrias Vinícolas Pedro Domecq, S.A. de C.V.
- Ingenio Bellavista, S.A. de C.V
- Ingenio El Potrero
- Ingenio La Margarita
- Ingenio Pantaleón (Guatemala)
- Nestle México, S.A. de C.V.
- Productores de Leche San Carlos, S.A. de C.V.
- Tequila Sauza S.A. de C.V.



## 4.5 CERTIFICACIONES Y RECONOCIMIENTOS



### 4.5.1 Certificado ISO-9001:2008

El Sistema de Gestión de la Calidad (SGC) adoptado por CIATEQ, tiene como propósito que los proyectos y servicios tecnológicos se realicen de manera planeada y ordenada en todo el desarrollo de su proceso, para obtener resultados de calidad consistentes y demostrables, que cumplan con los requisitos de los clientes, así como los requisitos legales y reglamentarios que apliquen, mejorando continuamente la eficacia del SGC.

El SGC de CIATEQ se rige por la siguiente Política de Calidad:

“Brindamos a nuestros clientes soluciones integrales, innovadoras, prácticas y oportunas que satisfacen sus expectativas y las de nuestros asociados mediante el mejoramiento continuo de la operación de CIATEQ”

Certificación del Sistema de Calidad:

En noviembre de 1998 CIATEQ obtuvo la certificación a su Sistema de Calidad, bajo la norma ISO 9001:1994 por parte del IMNC., siendo el primer Centro Público de Investigación y Desarrollo en México en conseguirlo.

En 2002 CIATEQ nuevamente es el primer Centro Público en lograr la certificación de su Sistema de Calidad bajo la norma ISO 9001:2000 en todos sus procesos y ubicaciones geográficas.

Posteriormente, en 2005 y nuevamente en el 2009 se recertifica el Sistema de Gestión de la Calidad bajo la norma ISO-9001:2000.

En el 2010, CIATEQ recibe la actualización de su certificado bajo la norma ISO-9001:2008.

Alcance del Sistema de Gestión de la Calidad





“Proyectos tecnológicos y de investigación para desarrollo de productos, procesos, sistemas y formación de recursos humanos, así como servicios tecnológicos asociados, en las instalaciones de Santiago de Querétaro, Qro., El Marqués, Qro., San Francisco de los Romo, Ags., San Luis Potosí, S.L.P., y oficinas foráneas de acuerdo a necesidades de ejecución de los proyectos.”

La Calidad de los productos ofrecidos por CIATEQ, es resultado del compromiso institucional hacia sus clientes, al ofrecerles soluciones que satisfacen sus expectativas, fruto de la innovación tecnológica y de la mejora continua de sus productos y de la propia organización.

#### **4.5.2 Acreditaciones EMA**

El Laboratorio Secundario de Metrología de CIATEQ cuenta con un sistema de Aseguramiento de Calidad conforme la NMX-EC-17025-IMNC-2006, Además de encontrarse bajo el alcance de la certificación ISO-9001:2008, el laboratorio es acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) como laboratorio de calibración y prueba en las siguientes magnitudes:

- Masa
- Dimensional
- Flujo
- Fuerza
- Presión
- Temperatura
- Volumen
- Eléctrica

Asimismo, el Laboratorio se encuentra acreditado por la EMA para la realización de Pruebas a encendedores.



### 4.5.3 Premio Nacional de Tecnología



El 17 de diciembre de 2003, CIATEQ recibió el Premio Nacional de Tecnología (PNT) de manos del Presidente de la República Vicente Fox Quesada en la categoría de "Centros de investigación aplicada, instituciones educativas y unidades de vinculación".

CIATEQ se hace merecedor del Premio Nacional de Tecnología porque ha desarrollado un modelo de gestión tecnológica único en México que ha demostrado su utilidad en diversos sectores productivos del país y porque el Centro ha desarrollado la capacidad, calidad y visión de futuro para perfeccionar dicho modelo y replicarlo, utilizando de la mejor manera los recursos tecnológicos del país.

La gestión de la tecnología que orienta el quehacer en CIATEQ permite conocer y entender el entorno, planear acciones, actuar, medir y analizar los resultados para retroalimentar y mejorar el modelo. El PNT busca premiar a quien tiene competitividad y la mejor gestión de tecnología, el sistema de gestión tecnológica bajo el cual CIATEQ se desarrolla cumple con los siguientes criterios del Modelo Nacional de Tecnología:

1. Conocimiento Estratégico e Integración de Mercados y Clientes.
2. Competitividad de productos y servicios.
3. Planeación Estratégica y Tecnológica.
4. Patrimonio Tecnológico.
5. Resultados de la Gestión de Tecnología.

El PNT es un reconocimiento que hace el Gobierno Federal a través de la Secretaría de Economía con el propósito de estimular y promocionar las prácticas exitosas de gestión de la tecnología y así apoyar el desarrollo estructurado de la industria y de organizaciones nacionales.



## 4.6 ALIANZAS

CIATEQ ha establecido diferentes alianzas estratégicas tanto con Instituciones educativas a nivel nacional e internacional, así como con instituciones especializadas, Centros de Investigación y empresas.

### 4.6.1 Instituciones Educativas Nacionales

- Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). Convenio general de colaboración sobre intercambio de estudiantes. Santiago de Querétaro, México.
- Colegio de Postgraduados Campus San Luis Potosí (Colpos). Convenio de colaboración científica y tecnológica para la coordinación de acciones e impulsar el desarrollo agropecuario integral del estado de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México.

### 4.6.2 Internacionales

- Laboratorio Universitario de Investigación en Producción Automatizada (LURPA). localizado en la Escuela Normal Superior de Cachan Francia (ENS de Cachan). Convenio de colaboración científica y de desarrollo tecnológico en actividades de formación en investigación de alto nivel en el dominio de la ingeniería de sistemas automatizados, calidad geométrica de piezas y mecanismos.
- Laboratorio de Automática Industrial (LAI) dependiente del Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de Lyon (INSA de Lyon). Convenio de colaboración científica con el objetivo de desarrollar y coordinar actividades de formación en investigación en alto nivel en el control de sistemas continuos y discretos. Lyon, Francia.
- Universidad del Valle (UNIVALLE). Convenio de cooperación tecnológica para promover el desarrollo de Investigación en la Agroindustria Azucarera. Cali, Colombia.
- Cuerpo de Paz del Gobierno de los Estados Unidos de Norteamérica (Peace Corps). Convenio de cooperación científica y tecnológica, intercambio de expertos. Washington, D.C., Estados Unidos.
- Universidad Nacional de Tucuman (UNT). Convenio de cooperación tecnológica en la Industria Azucarera. Tucuman, República de Argentina.

### 4.6.3 Especialistas

- Instituto de Soldadura y Tecnologías de Unión, S.C. (ISTUC). Alianza para realizar proyectos y servicios relacionados con el tema de soldadura y otras tecnologías de unión y corte. Santiago de Querétaro, México.
- Asociación Nacional de Industrias del Plástico, A.C. (ANIPAC). Convenio de apoyo en Investigación y Desarrollo Tecnológico. México, D.F.



- Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento, A.C. (ANEAS). Convenio general de colaboración científica, técnica y de capacitación sobre tecnologías hídras. México, D.F.
- Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI). Convenio de colaboración para promover la propiedad industrial en desarrollos tecnológicos. México, D.F.

#### 4.6.4 Centros de Investigación

- Colorado Engineering Experiment Station Inc. (CEESI). Convenio de cooperación para el desarrollo de sistemas de medida de fluidos. Colorado, Estados Unidos.
- Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA). Convenio de cooperación tecnológica para promover la investigación en la Agroindustria Azucarera. Cali, Colombia.
- Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) Saltillo Coahuila, México y Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A. de C.V. (COMIMSA). Saltillo Coahuila, México. Alianza para realizar actividades de difusión, comercialización y desarrollo de proyectos científicos y tecnológicos, estudios estratégicos, servicios técnicos especializados, transferencia de investigadores y tecnólogos, capacitación y adiestramiento, formación de recursos humanos, difusión del conocimiento.
- Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV). Convenio específico de colaboración para el rediseño de los sistemas de enfriamiento, moldes y elementos auxiliares para la fabricación de piezas de aluminio. Santiago de Querétaro, México.

#### 4.6.5 Empresas

- Delran Electromecánica, S.A. de C.V. (DELRAN). Convenio general de colaboración tecnológica para la realización de proyectos de servicios de ingeniería, inspección, pruebas y evaluación de vida remanente en partes y equipos de proceso. Córdoba Veracruz, México.
- Negocios Especializados, S.A. de C.V. (NEGESA). Convenio general de colaboración tecnológica para desarrollar y transferir tecnología para fabricación de máquinas de rotomoldeo con sistema de calentamiento de horno con conceptos innovadores. México, D.F.
- Tecnología Energética Ambiental, S.A. de C.V. (TEASA). Convenio general de colaboración y alianza tecnológica para el desarrollo de tecnologías de software, hardware, productos tecnológicos orientados al sector hídrico. Santiago de Querétaro, México.
- ASPER, S.A de C.V. Convenio general de colaboración y alianza tecnológica para el desarrollo conjunto de proyectos específicos de tecnologías de actuadores inteligentes de válvulas y productos tecnológicos orientados al mercado del Sector Energético, a efectos de

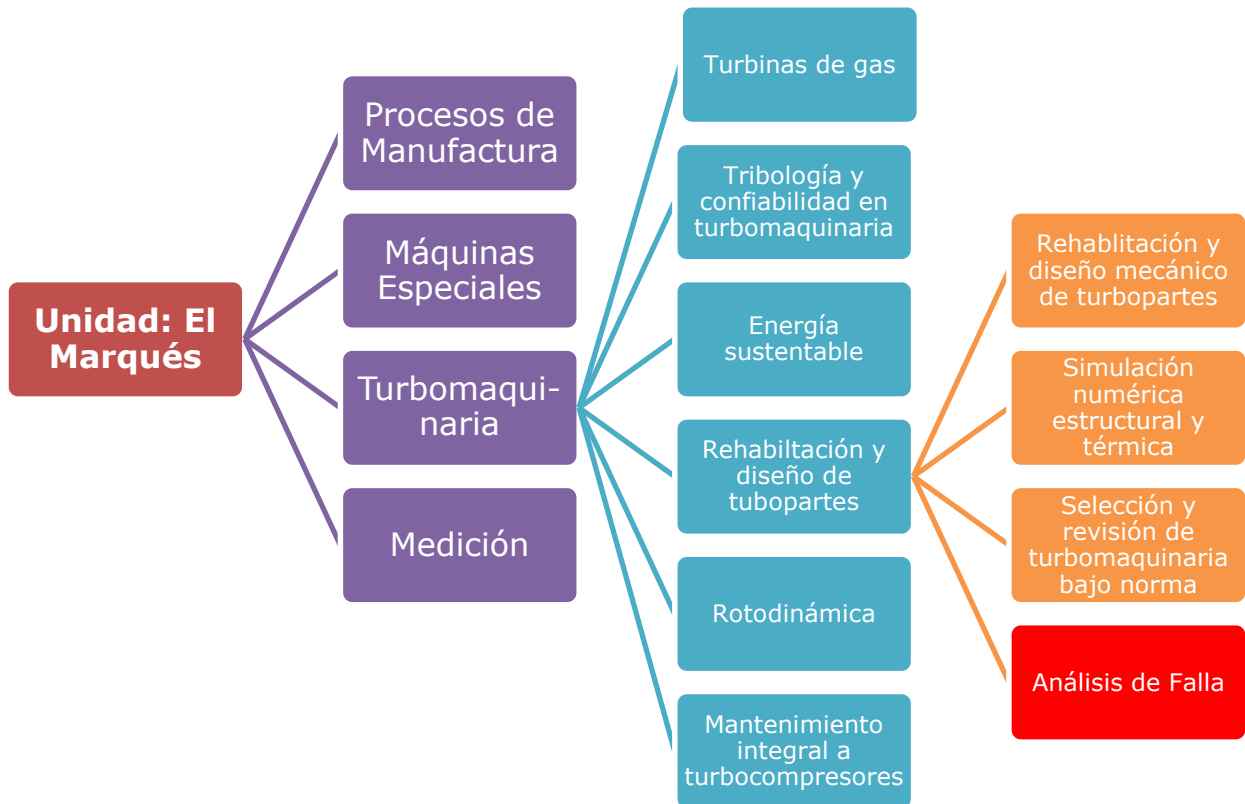


que puedan ser comercializados en México o en cualquier parte del mundo. Córdoba Veracruz, México.

- AYESA de México, S.A. de C.V. Convenio general de colaboración y alianza tecnológica para tecnologías de Información en el sector hídrico. Santiago de Querétaro, México.
- RESOURCE IT de México, S.C. (RIT). Alianza tecnológica para colaborar y coordinar esfuerzos, infraestructuras, etc., para el desarrollo de proyectos de tecnologías de información. Santiago de Querétaro, México.

#### 4.7 ÁREA DE TRABAJO

CIATEQ se encuentra organizado a través de unidades, gerencias y departamentos de trabajo. En el siguiente diagrama se observa la línea de trabajo en la cual se realizó el presente estudio.



**Figura 5 Organigrama de la Unidad El Marqués**

##### 4.7.1 Unidad El Marqués, Qro.

Las instalaciones de CIATEQ están ubicadas en avenida Manantiales 23-A en el Parque Industrial Bernardo Quintana, en el municipio de El Marqués, Qro., en una superficie de 17,560 m<sup>2</sup>. En esta Unidad se encuentra la Dirección Adjunta de Operaciones y representación de las Direcciones de negocio de Procesos de Manufactura, Máquinas Especiales, Maquinaria Rotativa y Equipos de Proceso. Asimismo, la unidad cuenta con áreas de diseño, de capacitación y tres naves industriales para la manufactura de máquinas y prototipos, una de ellas con un centro de pórtico desplazable e instrumental necesario para el desarrollo de procesos de pailería fundición y metalurgia.



#### 4.7.2 Gerencia de Turbomaquinaria

##### MISIÓN

Ofrecemos soluciones de ingeniería en turbomaquinaria al mercado nacional e internacional con personal profesional y calificado, satisfaciendo las necesidades y expectativas de nuestros clientes y asociados.

##### VISIÓN

Ser un grupo líder a nivel nacional en ofrecer soluciones de desarrollo e ingeniería de turbomaquinaria.

##### VALORES

**INNOVACIÓN.**- Aplicación de un enfoque creativo y multidisciplinario para desarrollar y conseguir resultados originales, satisfactorios y aplicables como una solución específica.

**PROFESIONALISMO.**- Cubrir y superar las expectativas del trabajo, concluido en forma oportuna, confiable, y desarrollado de acuerdo a los principios éticos fundamentales descritos en el código de conducta de CIATEQ.

**TRASCENDENCIA.**- Buscamos trascender con resultados basados en la generación, formalización y transmisión de conocimiento, que tengan impacto y consecuencias importantes en la sociedad, se extiendan y comuniquen a otros ámbitos, y perduren en el tiempo.

#### 4.7.3 Grupos de Trabajo de la Gerencia de Turbomaquinaria

- ❖ Turbinas de gas
- ❖ Tribología y confiabilidad para turbomaquinaria
- ❖ Energía sustentable
- ❖ *Rehabilitación y diseño de turbopartes*
- ❖ Rotodinámica
- ❖ Dinámica de fluidos computacional (CFD) para turbomaquinaria
- ❖ Mantenimiento integral a turbocompresores

#### 4.7.4 Grupo de Trabajo de Rehabilitación y Diseño de Turbopartes

- Rehabilitación y diseño mecánico de turbopartes
- Simulación numérica estructural y térmica
- Selección y revisión de turbomaquinaria bajo norma
- *Análisis de falla*



#### 4.7.5 Línea de Trabajo: Análisis de falla

- ⊙ Análisis de falla de turbopartes
- ⊙ Medición de profundidad de capa endurecida
- ⊙ Medición de microdureza
- ⊙ Espesor de recubrimiento
- ⊙ Evaluación de la degradación de materiales (fatiga, corrosión, desgaste, creep, esfuerzo)





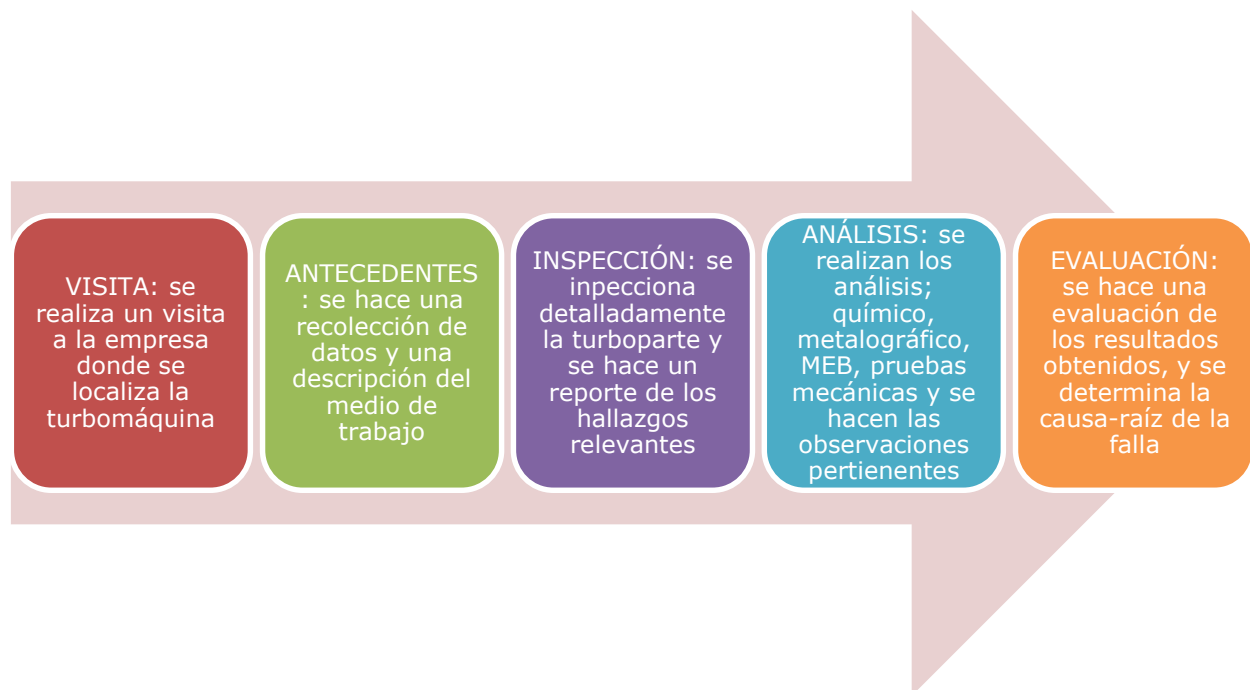
## 5 PROBLEMAS A RESOLVER

En el departamento en el cual se llevará a cabo la residencia profesional corresponde a “Rehabilitación y diseño de turbopartes”, el mismo que tiene bajo su responsabilidad el área de “Análisis de falla”.

Dicha área tiene como finalidad establecer el o los mecanismos responsables de la generación de fallas en turbomaquinaria a través de la determinación causa-raíz del problema. Además de hacer recomendaciones sobre acciones preventivas y correctivas para evitar futuras fallas de la misma índole garantizando así el buen funcionamiento del equipo.

El problema que se desea resolver es, hallar la raíz de la falla en una turbina de vapor la cual dejó de funcionar por haber presentado una falla grave que impidió la continuación de la generación eléctrica. El cliente requiere que se haga dicho análisis para poder rehabilitar la turbomáquina y evitar pérdidas tanto económicas como de producción en la empresa.

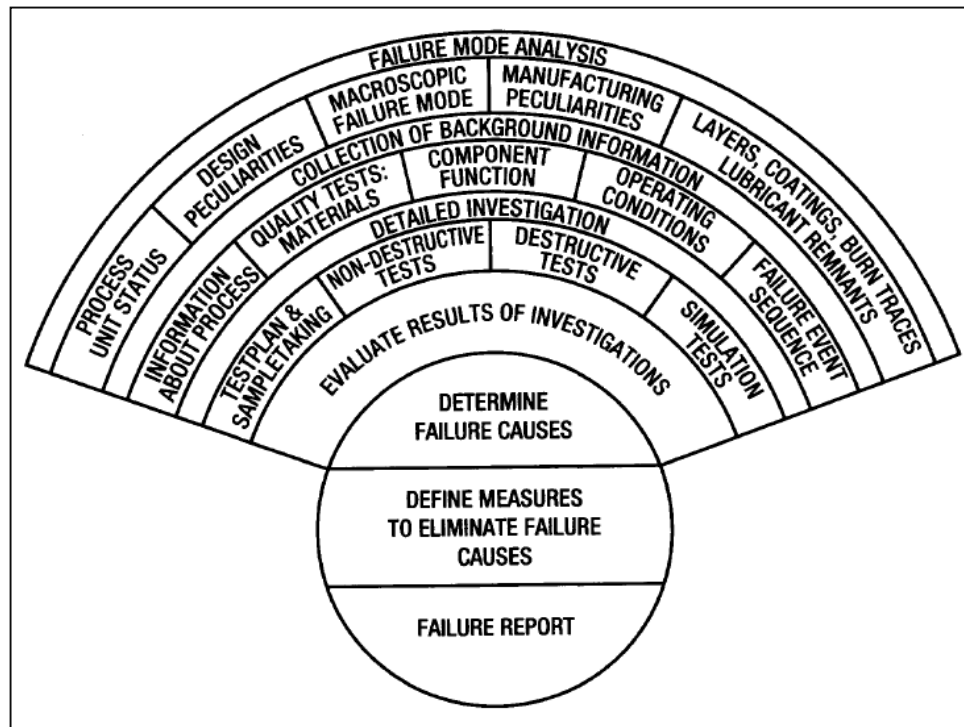
El siguiente esquema es el proceso que se debe de seguir para la realización del análisis de falla.



**Figura 6 Método de inspección de falla**

## 6 FUNDAMENTO TEÓRICO

El Análisis de fallas es un proceso que se lleva a cabo con el fin de determinar las causas o factores que han conducido a una pérdida no deseada de la funcionalidad de algún equipo. Muy a menudo, las fallas de maquinaria revelan una reacción en cadena de causa y efecto. El final de la cadena es generalmente una deficiencia de rendimiento comúnmente conocido como el síntoma, problemas, o simplemente "falla". La solución de problemas es un trabajo de inspección, ya que para definir los elementos de la reacción en cadena y luego procede a vincular la probable causa de la falla basada en la apariencia, es necesario comenzar por el efecto. Sin embargo, es muy importante conocer los mecanismos de falla según la maquinaria en análisis y de esta manera podremos llegar una solución óptima. El siguiente diagrama muestra los pasos a seguir para la solución de la falla, pero no necesariamente tienen que realizarse metódicamente ya que cada falla es diferente, por lo tanto su análisis puede diferir según sea el caso.



**Figura 7 Pasos para el análisis de falla**

Como ya se mencionó anteriormente, la finalidad de este trabajo es conocer la falla de una turbina de vapor, por lo que a continuación se presentan los modos de falla más comunes en dicha maquinaria.



## 6.1 CREEP

El creep es un fenómeno del material que afecta las regiones de alta temperatura donde circula el vapor y a componentes expuestos a tensión o esfuerzo cortante; tal efecto consiste en una deformación plástica lenta, esto ocurre en cualquier pieza bajo esfuerzos por largos periodos, este esfuerzo puede ser constante o fluctuante. El esfuerzo requerido para causar deformación por creep en un material es mucho más bajo que los valores que causan la falla cuando se aplica repentinamente. Es necesario reconocer que en el componente con más alta temperatura, la deflexión por creep será más rápida y por lo tanto la falla final ocurrirá a mayor velocidad.

Para componentes que son afectados por creep y por distorsión, es necesario tener presente el esfuerzo ya sea uni o multi-direccional y el periodo de operación en el que está siendo aplicado. El "creep strain" (deformación por creep) que resulta puede ocurrir a varias tasas de crecimiento y normalmente se dividen en tres fases, primaria, secundaria y terciaria. Estas fases de creep no son constantes ya que varían con el tiempo. La fase primaria es rápida, pero cuando la relación del creep entra a la segunda fase la deformación disminuye a un valor casi constante antes de que la falla se acelere en la tercera fase. Sin embargo en muchos casos dentro de la turbina de vapor la presencia de creep se puede detectar a tiempo antes que el daño se extienda y alcance la ruptura mecánica.

Los efectos del creep no tienen que ser necesariamente rupturas mecánicas ya que incluso se pueden formar algunas grietas. Esto es porque en muchas localidades dentro de la turbina los claros existentes entre las partes móviles y las partes estacionarias son muy pequeños.

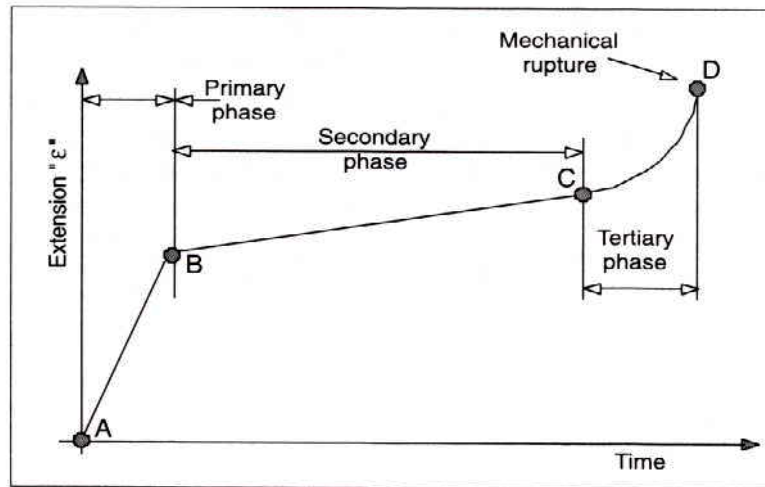
La relación del creep en algunos componentes bajo condiciones de operación definidas, depende de dos parámetros principales, nivel de esfuerzo y temperatura de operación.

Nivel de esfuerzo: los niveles de esfuerzo experimentados por un componente dependen de diversas variables, incluyendo la presión de las gotas de vapor, velocidad rotacional y flujo del vapor. Cada uno de estos parámetros varía durante la operación por lo cual los niveles de esfuerzos locales se verán modificados.

Temperatura de operación: la temperatura influye en la capacidad del material para resistir a la aplicación de esfuerzos y por lo tanto la relación a la cual ocurre la deformación por creep, a mayor temperatura, mayor presencia de creep. Por esta razón es necesario el control de la temperatura de diseño con niveles específicos en la caldera. Este diseño impone restricciones estrictas las cuales extenderán la vida individual y en conjunto de los componentes del equipo.

### *Fases del creep.-*

En la figura 2 se observa el comportamiento del material ante el creep, y sus fases de deformación



**Figura 8 Fases del creep**

Fase primaria "A-B": durante esta fase inicial la extensión ocurre relativamente rápida con aplicación de carga constante, normalmente con un ligero descenso. La relación de deformación es inicialmente rápida ya que las zonas más débiles dentro de las capas límites fallan a la aplicación de una carga relativamente pequeña.

Fase secundaria "B-C": después de la deformación inicial (fase primaria), la relación de creep disminuye a una relación relativamente constante. Después de la falla inicial en la capa límite, continúan una serie de rupturas. Durante este tiempo la deformación continua, pero existe una pequeña desaceleración de la misma.

Fase terciaria "C-D": cuando la deformación entra a esta fase, la relación de extensión se acelera hasta alcanzar la condición "D", y el tiempo de la ruptura mecánica ocurre. En la condición "D" el material ya no puede soportar la carga aplicada debido a la ruptura de la capa límite.

Los componentes de la turbina dañados por este mecanismo son los siguientes:

Álabes.- los álabes están sujetos a cargas continuas durante su operación. En las primeras etapas de la turbina, las cargas aplicadas se encuentran a temperaturas suficientemente altas que la deformación por creep se hace presente. La extensión de esta deformación y la necesidad de reemplazar los álabes son consecuencia dependiente de un número de factores, es decir, la magnitud de la carga y el tiempo que los álabes han estado en operación. Otro factor que puede inducir daño en los álabes, es la falla que tiene origen en ciertas tolerancias y especificaciones dimensionales de diseño ya que bajo la influencia de una carga centrífuga el perno se puede distorsionar o deslizar, permitiendo que el álabe se mueva radialmente hacia el exterior.

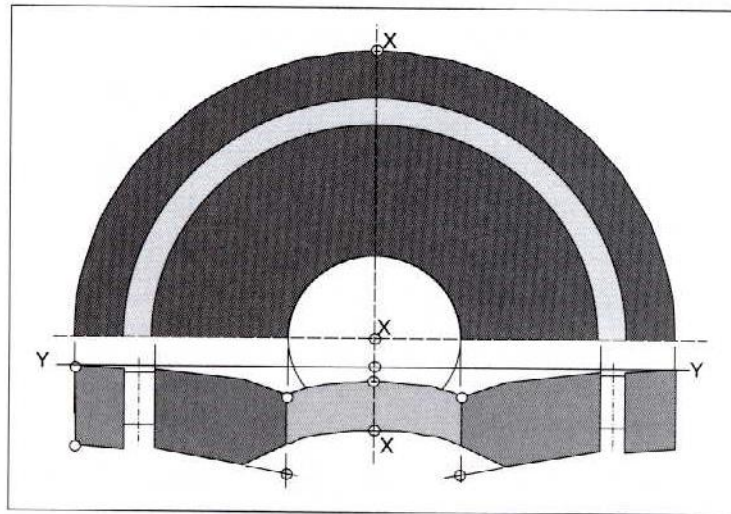
Rotores.- son componentes que están sujetos a altas temperaturas y presiones y por lo tanto a deformación por creep. Este daño ocurre a menudo en las regiones donde existe un

alto esfuerzo. Esto es frecuentemente en regiones donde la carga es transferida desde la raíz del álabe hasta el borde del rotor.

**Diafragmas.**-los diafragmas son fabricados en tres partes, un anillo exterior, un anillo de álabes que consta de un cierto número de elementos y una rueda interior. Cada uno de estos tres componentes del diafragma son sujetos a un diferencial de presión de una fila de álabes estáticos.

El vapor inicial al ser inducido al equipo, el esfuerzo en varios componentes del diafragma es irrelevante ya que su magnitud se encuentra en el orden de 5,000-10,000 psi. Sin embargo, las cargas axiales aunque no sean altas resultan en una deflexión aguas abajo del diafragma. La figura 3 muestra la deflexión del diafragma en el diámetro interior. El máximo esfuerzo que ocurre en el diafragma debido al diferencial de presión se presenta a lo largo del eje "XX", el cual está a 90° del eje "YY". Es importante tomar en cuenta que la máxima deflexión no ocurre en el eje del máximo esfuerzo sino en la unión horizontal.

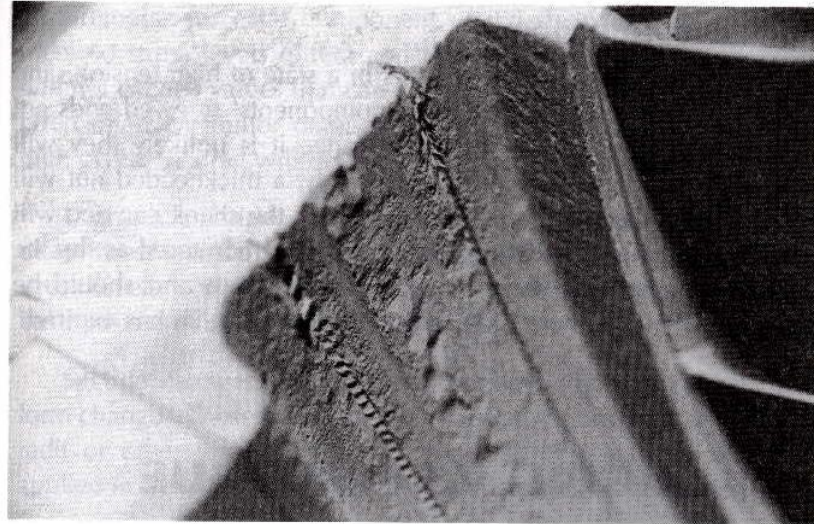
Los diafragmas tienen, en comparación con los componentes móviles, relativamente bajos niveles de esfuerzos inducidos, por lo que es poco probable que fallen de una manera catastrófica. Cuando los equipos se encuentran en servicio cada diafragma experimenta una deformación elástica inicial y dependiendo del tiempo y temperaturas a las que se encuentre expuesto se puede iniciar una deformación plástica.



**Figura 9 Deflexión del diafragma en el diámetro interior sobre la junta horizontal**

**Carcasa y discos.**- la carcasa de las turbinas y los discos están sujetos a elevados niveles de esfuerzo y temperatura, bajo estas condiciones se puede presentar cierta deformación por creep causando así que la forma circular de la carcasa se modifique a una forma elíptica a través de la reducción o aumento de la unión horizontal. Las posibles consecuencias de

esta deformación dependen del diseño, en algunos casos tales deformaciones pueden causar serios daños.



**Figura 10** Deformación por creep en la superficie interior de la carcasa

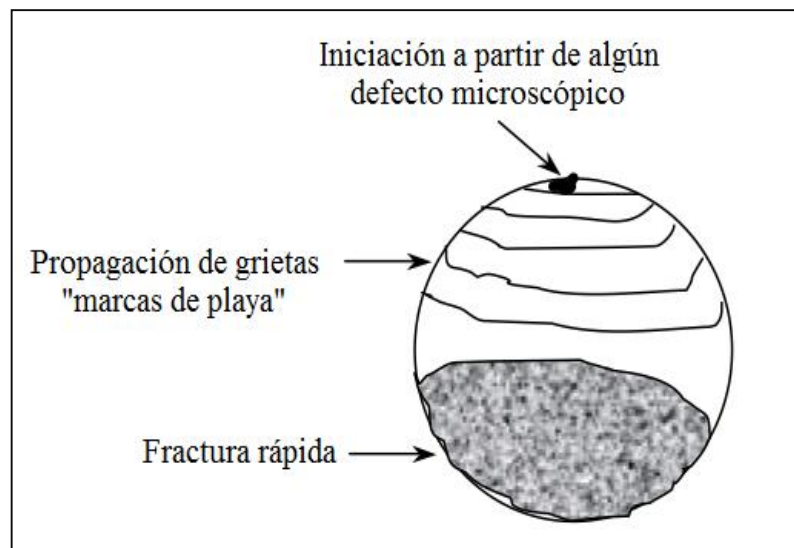
## 6.2 FATIGA

De manera general, la fatiga es un tipo de falla mecánica que se produce a esfuerzos aplicados menores que los límites estáticos del material, solo que en fatiga, estos esfuerzos son aplicados de manera repetida (cíclica).

Los factores que influyen en la falla por fatiga son:

- Temperatura
- Aspectos microestructurales
- Discontinuidades (muescas, ángulos, huecos)
- Ambiente (corrosión)

La primera parte del proceso general es la iniciación de grietas, seguida de la propagación de dichas grietas hasta la ruptura.



**Figura 11 Fractura por fatiga**

### 6.2.1 Fatiga por altos ciclos (HCF)

La fatiga por altos ciclos se presenta cuando existen cargas alternantes cuyos valores máximos se pueden considerar menores a los valores necesarios para causar una falla debido a una aplicación no alternante.

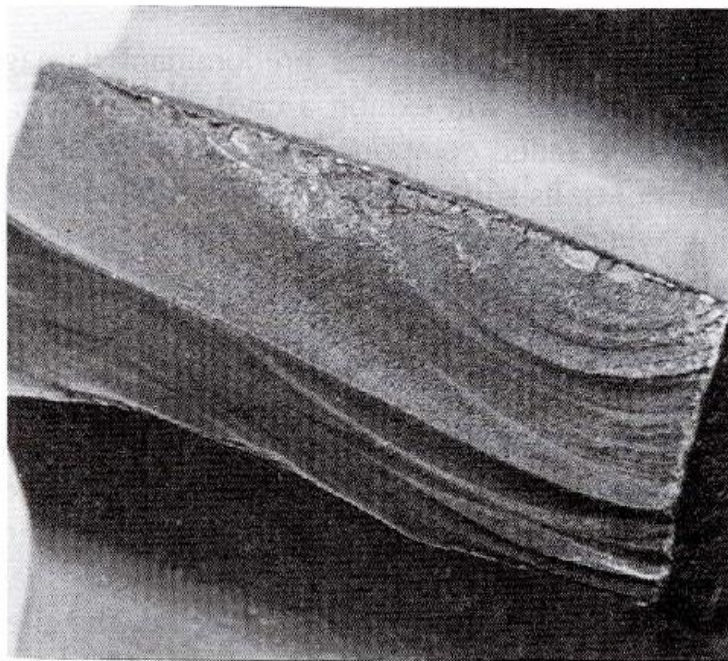
Los valores para considerar una fatiga por altos o bajos ciclos no están bien delimitados, sin embargo de forma general se puede usar el siguiente rango.

Bajos ciclos (LCF)  $1 < \text{ciclos} < 10,000$  Altos ciclos (HCF)

Ese mecanismo de falla es probablemente el más común observado en los componentes de falla de una turbina de vapor. La alta frecuencia de este tipo de falla es una consecuencia de muchas fuentes de cargas cíclicas generadas dentro del flujo del vapor. Estas cargas cíclicas, al ser de baja magnitud, su frecuencia es alta en los componentes que se encuentran rotando a una alta velocidad y por lo tanto acumulan demasiado esfuerzo cíclico dentro de un periodo relativamente corto.

En la práctica es poco probable que la carga cíclica sea continua sin algún tipo de interrupción, es decir, una condición transitoria (ejemplo, un cambio de carga o temperatura), al presentarse tal estado se elevaran los niveles de esfuerzo en el componente. El efecto de estas elevaciones incrementará el nivel de esfuerzo en la punta de la grieta, extendiéndose a un pequeño desgarre. Esta falla en la punta de la grieta aparecerá en forma de una "beach mark" (marca de playa), característica típica de una falla por HCF.

Las "beach marks" (marcas de playa) son indicios de cambios de cargas o esfuerzos en un componente en operación. La figura 6 muestra una porción de la raíz de un álabe donde da inicio la falla. En esta zona de iniciación se encontró desgaste por fatiga, picadura que fue causada por un esfuerzo elevado.





















**Figura 12 Fractura de fatiga por altos ciclos sobre la superficie de la raíz de un álabe**

En la siguiente tabla podemos observar algunas superficies de fractura según el efecto de la carga y concentradores de esfuerzo.



**Tabla 1 Apariencia de la fractura según el efecto de la carga**

Condición de esfuerzos	Sin concentración de esfuerzos		Baja concentración de esfuerzos		Alta concentración de esfuerzos	
	Bajo esfuerzo	Alto esfuerzo	Bajo esfuerzo	Alto esfuerzo	Bajo esfuerzo	Alto esfuerzo
<b>Un camino de flexión</b>						
<b>Dos caminos de flexión</b>						
<b>Flexión invertida y rotación</b>						

La fatiga por altos ciclos es más destructiva en regiones donde existe un alto nivel de esfuerzos directos; la localización más habitual para estos esfuerzos es donde existe un alto concentrador. A continuación se mencionan 3 causas básicas que producen una concentración de esfuerzos:

**Cambios de sección.**- en las consideraciones de diseño a menudo se requieren cambios de forma o de sección. Estos cambios pueden introducir regiones donde existan filetes o radios muy pequeños u otras formas. Esto causa que la carga aplicada sea no uniforme, lo cual hace que los niveles de esfuerzo incrementen en esa área.

**Deficiencias del material.**- los materiales seleccionados para las turbinas de vapor son cuidadosamente examinados para garantizar su buen desempeño (es decir, minimizar el nivel de inclusiones no metálicas). Estos defectos no pueden ser eliminados en su totalidad debido a que es posible que este tipo de fallas se introduzcan durante el proceso de manufactura.

**Mecanizado o montaje.**- existen muchos procesos de mecanizados y ensambles donde se pueden introducir algunas marcas de superficie, golpes, rayones, etc. Algunos de estos incluso se pueden llegar a ocultar por completo durante el proceso haciendo así más difícil su detección, los cuales llegan a formar zonas con una gran concentración de esfuerzos capaces de causar daños.

Componentes afectados por la fatiga por altos ciclos:

**Álabes.**- Los álabes en una turbina son los elementos más susceptibles a la fatiga por altos ciclos y sus esfuerzos inducidos son causados por una vibración desarrollada dentro del flujo del vapor durante su operación. La magnitud de estos esfuerzos varía de etapa en etapa, y son influenciados por la frecuencia y magnitud de la vibración detectada. Las características físicas de los álabes, tamaño, forma y el material con el que se fabrican,

también influyen en el efecto total de la vibración. Algunas de las fuentes de vibración más comunes según el recorrido del vapor se presentan en la tabla 2.

**Tabla 2 Fuentes de vibración**

Sección	Armónica	Fuentes
<b>Alta Presión</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alta por revolución (40x)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Limites de tolerancia de la boquilla</li> <li>Turbulencia estructural</li> </ul>
<b>Presión Intermedia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Frecuencia de boquilla de paso (FBP)</li> <li>2 X (FBP)</li> <li>3 X (FBP)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Boquillas</li> <li>Diafragmas</li> <li>Diafragmas</li> </ul>
<b>Baja Presión</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Una por revolución</li> <li>Dos por revolución</li> <li>Múltiple / rev</li> <li>Media / rev</li> <li>Alta / rev</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desplazamiento relativo de boquillas a álabes</li> <li>Juntas de diafragmas</li> <li>Soportes estructurales en el camino del vapor</li> <li>Diafragmas, perturbaciones aereoelásticas</li> <li>Turbulencia en boquilla</li> <li>Turbulencia estructural</li> </ul>

Estos diversos modos de vibración pueden causar que el álabe vibre de forma axial, tangencial o torsional. Hay varias armónicas en estos modos y la magnitud del esfuerzo inducido es máximo cuando la frecuencia de la fuerza está en la fase de la frecuencia natural del álabe mismo; esta coincidencia causa un incremento en la amplitud de la vibración.

La tasa a la cual las grietas crecen a la fatiga por altos ciclos depende de un número de factores:

Temperatura del material.- la temperatura a la cual el material está trabajando tiene un gran efecto sobre la tasa de crecimiento, siendo más rápida a temperaturas más altas.

Nivel de esfuerzo aplicado.- entre más alto sea el esfuerzo directo aplicado a los componentes, la grieta crecerá más rápidamente.

Frecuencia de la carga aplicada.- el crecimiento de alguna grieta es una consecuencia de la inversión del esfuerzo sobre los cristales del material. Por lo tanto a más alta tasa de esfuerzo inverso aplicado, la grieta crecerá más rápido.

Magnitud de la fuerza aplicada.- cuanto mayor sea la magnitud de la carga alternante, mayor es el esfuerzo sobre la superficie de falla y el extremo de la grieta.



### 6.2.2 Fatiga por bajos ciclos (LCF)

Este fenómeno está asociado con los cambios de temperatura que ocurren en el vapor, que a su vez modifica la temperatura de los componentes de la turbina. Sin embargo, cualquier cambio con grandes repeticiones en esfuerzos o tensiones puede iniciar o conducir a una condición de falla, independientemente de los cambios de temperatura de operación. La fatiga por bajos ciclos es aquella que se produce a un elevado valor de esfuerzo y a un bajo número de ciclos.

Los componentes de una turbina, móviles y fijos, sufren un impacto diferente a la expansión y contracción térmica como consecuencia de una serie de fenómenos de operación. Esta alta tasa de cambios en las condiciones del vapor puede causar altas magnitudes de esfuerzos internos que se desarrollan en los materiales de los componentes. Los componentes pueden estar rodeados por cambios de temperatura del vapor (es decir los álabes, rotor, diafragma) o bien tener una superficie expuesta a grandes variaciones de temperatura.

El daño que se produce a causa de cambios de altos esfuerzos es denominado "bajos ciclos" (LCF) porque el número de ciclos requeridos para que el material falle es relativamente bajo comparado con el número de ciclos a los que ocurre una falla de "altos ciclos" (HCF). Por lo tanto las principales diferencias de causa y efecto entre la fatiga por altos y bajos ciclos son:

- La fatiga por altos ciclos ocurre a un número de ciclos elevados. La fatiga por bajos ciclos requiere menos fluctuaciones de esfuerzos cíclicos.
- El nivel de esfuerzo y tensión en la fatiga de bajos ciclos es alto, mientras que el nivel de esfuerzo de altos ciclos puede estar por debajo del punto de cedencia del material.
- Cuando ocurre una fatiga por bajos ciclos existe deformación en el material y fracturas superficiales. En los altos ciclos no se presenta deformación perceptible.
- No existe una clara definición en cuanto al número de ciclos para la transición de altos a bajos. Un total de 10,000 ciclos se sugiere como un límite, pero una definición más realista se puede basar en la apariencia de la superficie de la fractura y la presencia o ausencia de deformación mecánica del material.
- Otra diferencia entre la fatiga por altos y bajos ciclos radica en lo que ocurre durante el tiempo de falla, en la fatiga por altos ciclos la iniciación de la grieta se lleva la mayor parte del tiempo de falla, mientras que en la fatiga por bajos ciclos la mayor parte del tiempo está en la propagación.

- Una consideración importante en las grietas por LCF es que son visibles a muy temprana vida del componente, pero en una falla por HCF la grieta puede estar muy avanzada en la fase de incubación.

Las turbinas están expuestas a variaciones de temperatura del vapor por lo que pueden ser sujetas de forma muy frecuente a daños por bajos ciclos, tales daños pueden ocurrir en ambos componentes ya sean móviles o fijos.



**Figura 13** Grieta de fatiga por bajos ciclos sobre una carcasa de alta presión

### 6.2.3 Fatiga con corrosión

La acción simultánea del esfuerzo cíclico y del ataque químico resulta como un mecanismo de falla llamado fatiga con corrosión, cuando esto ocurre la resistencia a la fatiga se reduce y la propagación de grietas se acelera. La fatiga con corrosión puede iniciar sobre un claro, o una superficie sin huecos, es decir, no se requiere forzosamente una discontinuidad mecánica.

El mecanismo de iniciación de fractura de fatiga con corrosión ocurre por la secuencia de ruptura/formación de capas de óxido y la consecuente formación de picadura por corrosión. Cuando estas picaduras alcanzan cierta forma y tamaño, comienzan a actuar como concentradores de esfuerzo, las grietas emergen de ellos y a causa de las cargas cíclicas empiezan a propagarse.

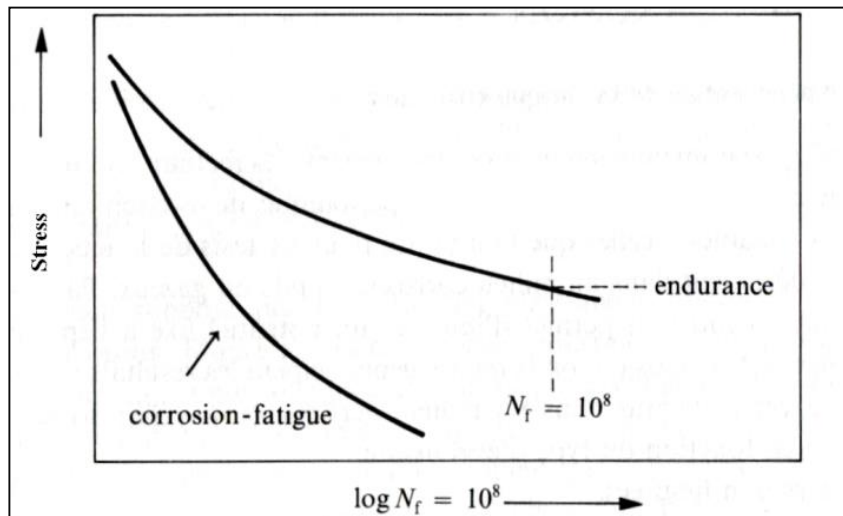
En este tipo de daño, la superficie de falla normalmente se encuentra cubierta por algún agente corrosivo, mientras que el final de la superficie se encuentra limpia. Esta forma de falla se distingue del SCC (stress corrosion cracking) en que el esfuerzo aplicado es cíclico y la falla es por un mecanismo de fatiga, siendo las marcas coincidentes con la HCF. Tales fallas tienen una tendencia a iniciar en los puntos donde se concentran los productos

corrosivos, y el nivel de concentración de esfuerzos causa efectos de un alto esfuerzo a la tensión; las grietas que se originan pueden ser transgranulares o intergranulares. Sin embargo, estas fallas de fatiga con corrosión normalmente son transgranulares.

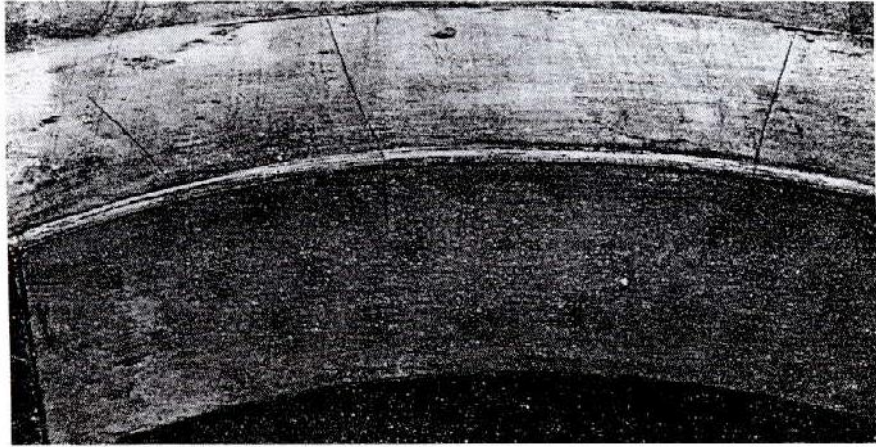
El total de condiciones que rodean a la fatiga con corrosión son complejas, ya que los niveles y formas de esfuerzo pueden variar, esfuerzos directos de bajos niveles con esfuerzos alternantes de altos niveles, o esfuerzos directos de altos niveles con esfuerzos alternantes de bajas amplitudes.

Otras variables que afectan la tasa de daño son la concentración de corrosivos aplicados al componente de falla, la temperatura local del ambiente y un posible número de ciclos a través de los cuales el componente experimenta ambientes húmedos o secos.

Una característica general de la fatiga con corrosión es el hecho que la vida del material disminuye según el número de ciclos, en la siguiente gráfica de esfuerzo contra ciclos (S-N), se puede observar el comportamiento de la curva de un acero con y sin afectación de la fatiga con corrosión.



**Figura 14 Curva S-N, Corrosión-Fatiga**



***Figura 15*** *Porción de un disco con grietas por fatiga con corrosión*



### 6.3 FRAGILIZACIÓN POR TEMPLADO

La fragilización por templado es un fenómeno que afecta a las etapas más calientes de alta presión y en las zonas de recalentamiento en una turbina. Esto ocurre a consecuencia de la migración de impurezas tales como el sulfuro, arsénico, fósforo, estaño y antimonio hacia los límites de grano del material. Los aceros al carbono con menos del 0.5 % de manganeso no son susceptibles a la fragilización por templado.

Este fenómeno ocurre como resultado de una larga exposición a altas temperaturas de solubilidad. Como resultado, la tenacidad del material se reduce. La temperatura de solubilidad es normalmente considerada 750 °F (398.9 °C) a 1,050 °F (565.6 °C) para aceros de baja aleación usados en la fabricación de turbinas. Esta situación puede presentar una seria condición en rotores donde la fragilización puede producir la falla del elemento.

El tipo de fractura generada por este mecanismo en los aceros, es intergranular y se propaga a lo largo de los límites de grano austenítico. La fragilización solo ocurre en presencia de impurezas específicas y mayor aun cuando se encuentran concentradas

## 6.4 EROSIÓN

La erosión es el desprendimiento de material presente en una superficie sólida, la forma más común de erosión es el daño causado por la humedad del vapor, este daño resulta de la fuerza de impacto desarrollada entre las gotas de humedad formadas por el vapor y los álabes. Durante su paso entre los álabes, una porción de esta humedad será depositada en algunos otros elementos de la turbina. El agua fluye como una película a través de las superficies dentro de las regiones donde dicha película se colecta en forma de pequeños charcos; estos son eventualmente succionados de las superficies y vuelven a entrar al flujo de vapor principal, moviéndose a velocidades menores. Esta humedad al ser succionada de la parte fija de la turbina, causa impacto por erosión en el borde de los álabes. La figura 10 muestra una forma típica de dicho impacto, donde se pueden observar cráteres sobre el borde de los álabes y el grado de penetración a lo largo de la cara de succión.

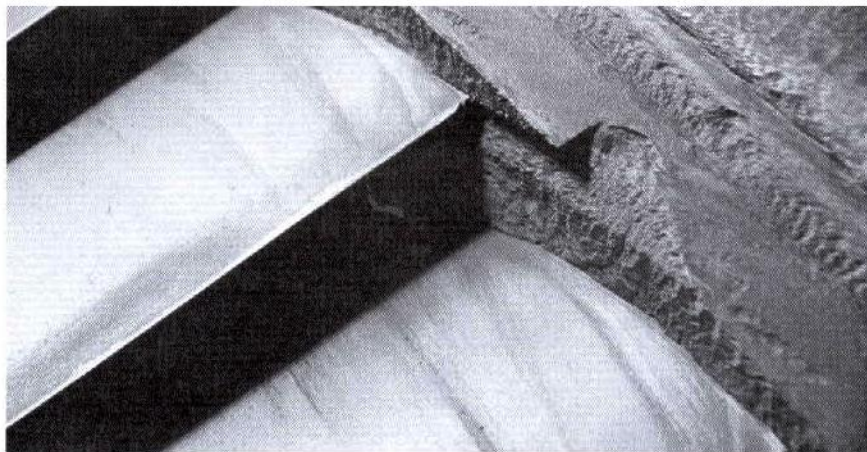


**Figura 16 Erosión por impacto de humedad**



#### 6.4.1 Lavado por erosión (Washing Erosion)

Existen etapas dentro de la turbina donde el vapor fluye a altas velocidades de forma radial a través de los álabes, y hacia las paredes externas e internas de la unidad. Bajo ciertas condiciones de operación se presenta un fenómeno llamado "washing erosion" (lavado por erosión), este tipo de erosión remueve metal ya sea en el interior o exterior del diámetro de descarga. El material perdido puede causar una incorrecta salida de vapor en los diámetros de descarga, además de modificar la rotación de los álabes respecto a la posición del diafragma. El incremento de altura del vapor a la descarga causará que el vapor se impacte sobre la fila de álabes, lo cual causará una pérdida de eficiencia, además que inducirá la formación de un flujo turbulento en los álabes. En la figura 11 se muestra un diafragma, el cual ha sido atacado por este tipo de erosión en la pared exterior. Una vez que esto ha ocurrido en cada paso, se puede llegar a inducir un estímulo a la siguiente fila de álabes móviles, igual al número de álabes fijos.



*Figura 17 Pérdida de material en la pared exterior causado por el flujo de agua*

#### 6.4.2 Daño por impacto de partículas sólidas

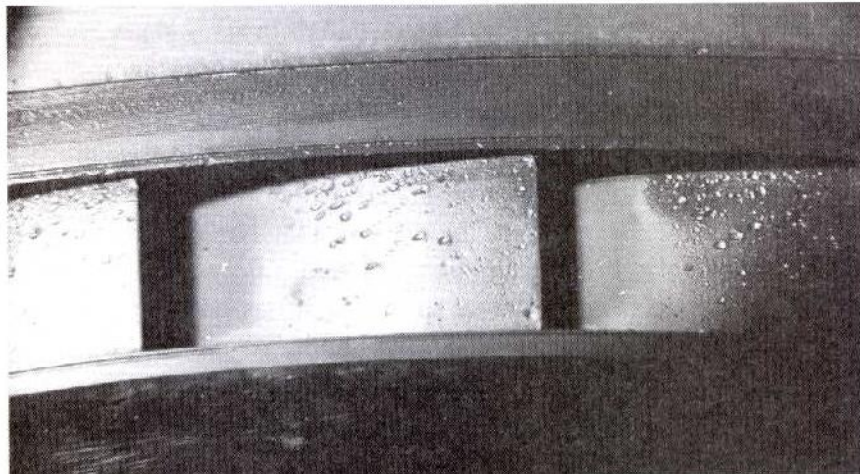
Los componentes móviles y fijos de las turbinas de vapor se encuentran expuestos a impactos por partículas sólidas, que provienen a partir del vapor y de la composición química del metal, generalmente el daño presente en las partes fijas no es tan severo como el de las partes móviles, ya que normalmente se tiene una mayor velocidad al impacto entre los álabes móviles y algunas partículas. También, los álabes móviles tienden a la formación de pequeños agujeros sobre el borde de la entrada del vapor, mientras que el diafragma tiene una mayor tendencia al daño en las áreas de salida y descarga. El área última es menos robusta y el daño puede ocurrir sobre la cara de presión o succión.

A pesar del impacto a baja velocidad en el diafragma (comparado con los álabes móviles), éste puede resultar en cráteres de varios tamaños y formas, producidos sobre las

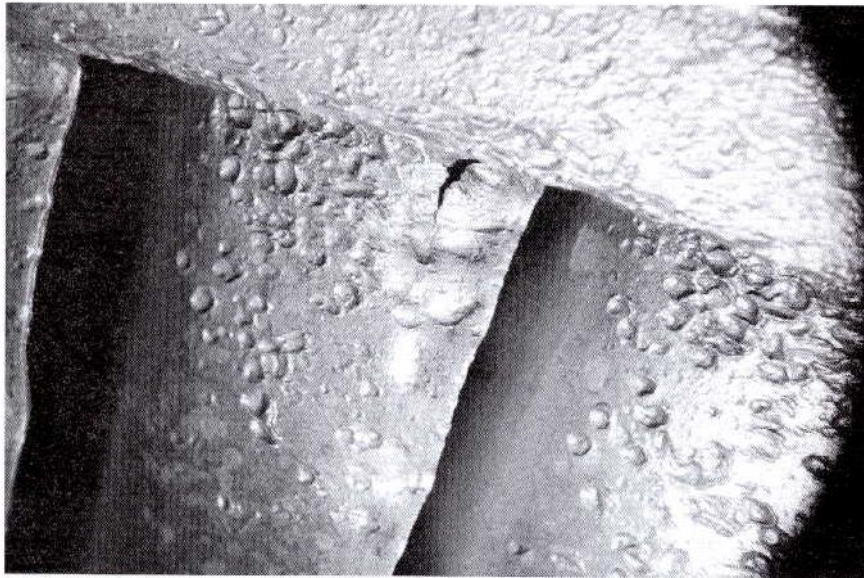
superficies de los álabes, o bien un daño masivo, presentando desprendimiento de material. Estos cráteres de impacto serán una fuente de continua pérdida de energía y una degradación de la eficiencia. Si estos cráteres son lo suficientemente grandes, tales áreas de daño también pueden convertirse en una fuente de disturbios dentro del flujo de vapor, lo que puede inducir daños debido a las vibraciones en los álabes de las filas contiguas. Tal nivel de daño no es una situación común aunque este efecto debe ser considerado en un análisis de falla.

La sección transversal del perfil de un álabe fijo, la cual es más delgada que la de un álabe móvil tiende a deformarse a una mayor medida que otras partes del perfil. En adición, el daño a la descarga puede afectar al área y ángulo de la salida del vapor.

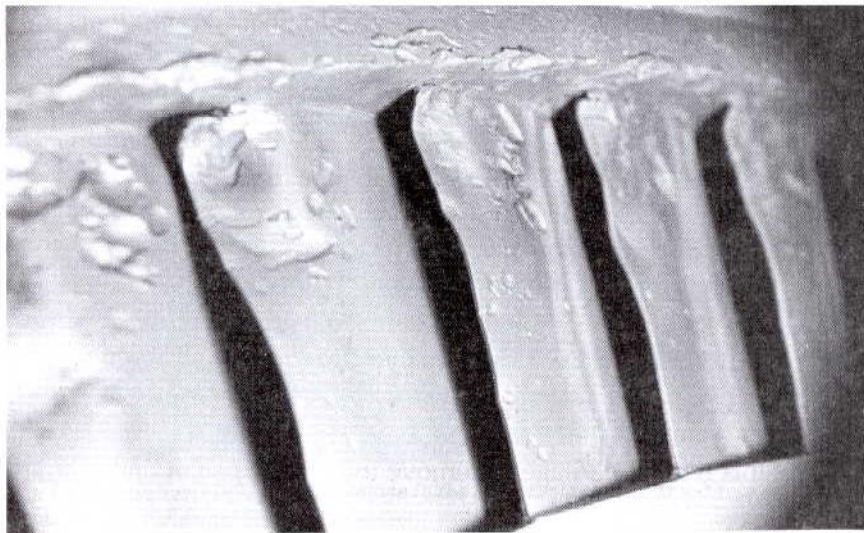
El diafragma regularmente es dañado por partículas generadas por el paso del vapor. Es difícil cuantificar el daño causado por las partículas sólidas, el método más utilizado es el nivel de reparación requerido para que los componentes puedan regresar a operación. Se clasifican en los siguientes niveles, ligero, medio e intenso.



**Figura 18 Daño ligero generado por partículas sólidas**



**Figura 19. Daño medio generado por partículas sólidas**



**Figura 20 Daño intenso generado por partículas sólidas**



## 6.5 CORROSIÓN

### 6.5.1 Calidad del vapor

La calidad del vapor en una turbina es de vital importancia, ya que de ella dependerá en gran manera el funcionamiento y la eficiencia de esta. El rango de valores de elementos en ppm se indica en la tabla 3 considerando los límites superiores necesarios para producir vapor con suficiente pureza. La operación más allá de estos límites se debe evitar o bien implementar una inmediata acción correctiva.

**Tabla 3 Composición del agua**

Contaminante	Operación normal	Condición límite	
		2 Semanas	24 Horas
<b>Oxígeno disuelto</b>	< 10	10 - 30	30 - 100
<b>Sodio</b>	< 5	5 - 10	10 - 20
<b>Cloruros</b>	< 5	5 - 10	10 - 20
<b>Sílice</b>	< 10	10 - 20	20 - 50
<b>Cobre</b>	< 2		
<b>Hierro</b>	< 20		
<b>Fosfato de sodio</b>	2.3 - 2.7		
<b>Sulfuros y sulfatos</b>	Poco detectable, por lo que debe ser analizado al menos una vez a la semana		

La composición y concentración de los compuestos depositados se encuentran en función de su origen. Probablemente el agente corrosivo encontrado frecuentemente afecta a los álabes y potencialmente los más dañinos son cloruro e hidróxido de sodio. La introducción de contaminantes cáusticos dentro del ciclo del agua o vapor generalmente se le atribuye al ingreso de sal común (NaCl) dentro del sistema, y a la disociación de sus iones sodio (Na) y cloro (Cl), los cuales pueden recombinarse con iones de hidróxido (OH) y ácido clorhídrico (HCl).

Ya que estos compuestos son normalmente controlados a niveles bajos, es necesario considerar ciertos mecanismos por si llega a incrementar su concentración a niveles que pueden causar el inicio de algún daño por corrosión.

El punto de fusión del hidróxido de sodio está por encima de 600 °F (565.6 °C). Por lo que a temperaturas inferiores los iones aparecen en solución o depósitos sobre los elementos donde el vapor circula. Estas moléculas de hidróxido de sodio, una vez que son depositadas en el agua pueden retenerse dentro de las hendiduras del material.

El aumento de esta actividad también es posible cuando el equipo está operando con vapor en condiciones fuera de diseño, o bien por cambios de temperatura en la entrada ya que éstos causan una fluctuación o variación en las diversas etapas de la turbina. Bajo estas condiciones, algunas regiones y componentes del equipo que deben estar en regiones libres



de sodio, entran a zonas activas de hidróxido de sodio y como consecuencia comienzan a sufrir un ataque corrosivo.

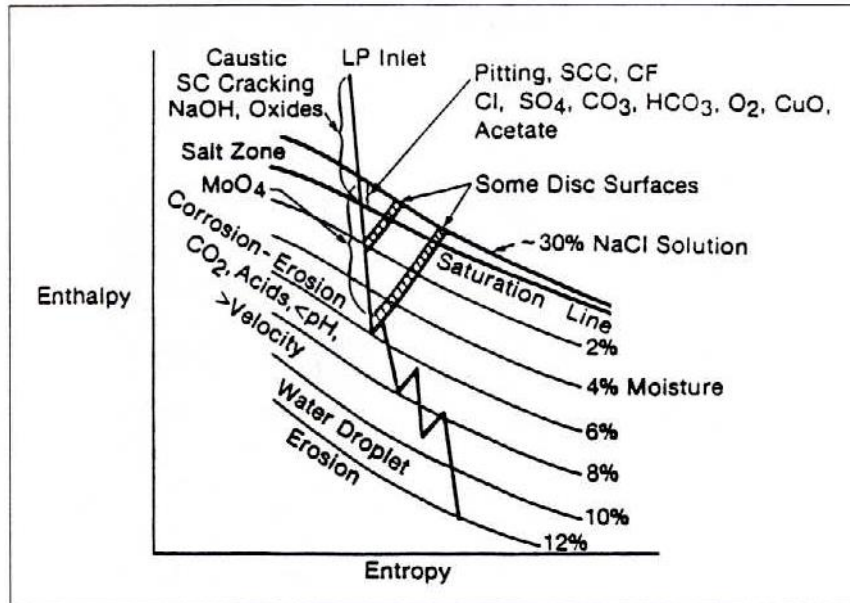
En áreas de alta temperatura y presión, el esfuerzo por corrosión debido a la actividad del hidróxido de sodio no curre tan fácilmente. Eso se debe principalmente a que el vapor se encuentra a temperaturas por encima del punto de fusión del hidróxido de sodio.

El número de fallas y casos de daño por corrosión encontrados en zonas de baja presión de la turbina de vapor (debido al hidróxido de sodio) indican que los componentes son vulnerables, si los agentes corrosivos pueden adherirse a superficies y encontrar hendiduras donde puedan migrar y concentrarse.

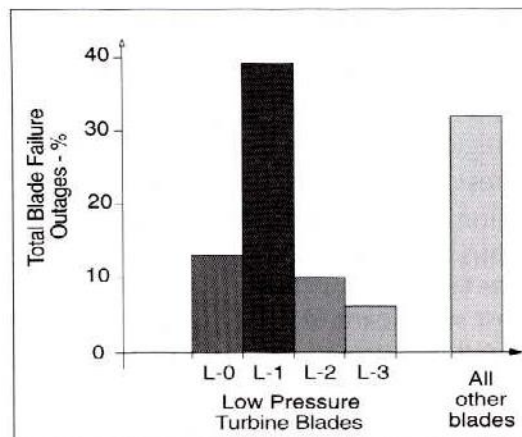
Para evaluar los posibles cambios en cuanto a la concentración de los corrosivos influenciados por las condiciones del vapor en varias localidades, se deben considerar los siguientes factores:

- ⊙ En operación a plena carga, las etapas de baja presión vulnerables al ataque corrosivo pueden operar en las regiones de saturación.
- ⊙ En los elementos donde existe un sellado de flujo como son diafragmas, extremos del eje, etc.; cuando el vapor no se expande puede causar un calentamiento local por encima de la temperatura de saturación.

En la figura 15 se muestra el diagrama de Mollier para el vapor, donde la línea de expansión indica la sección de baja presión de una típica unidad y se pueden identificar las regiones donde se presenta la concentración de impurezas. Este diagrama muestra la razón por la cual ocurren un número significativo de fallas en la región donde existe formación de humedad y concentración y depósitos corrosivos.



**Figura 21 Diagrama de Mollier, muestra las regiones, o condiciones donde los iones corrosivos salen en solución desde el vapor**



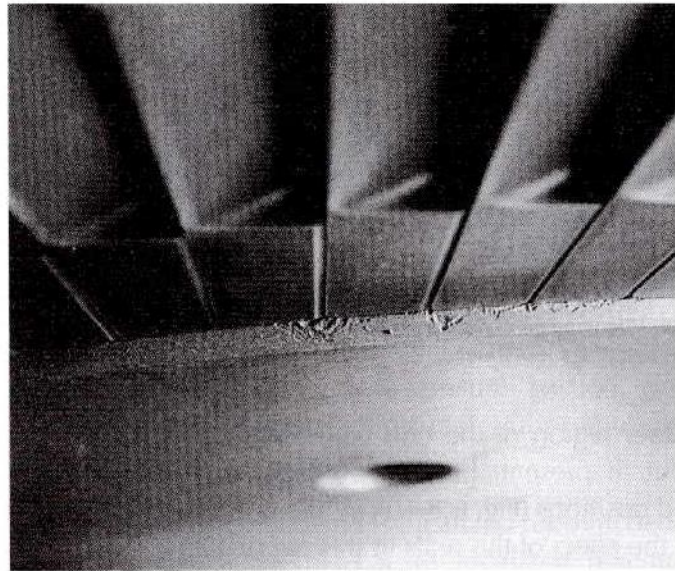
**Figura 22 Resumen de falla en álabes, se observa que las fallas predominan en las regiones donde la humedad está presente**

*Mecanismo de falla debido a impurezas del vapor:*

Picaduras por corrosión.- los componentes localizados por encima de las regiones de humedad son particularmente susceptibles a las picaduras por corrosión, este fenómeno ocurre sobre la superficie de varios componentes, a menudo en la zona de álabes y diafragmas. Sin embargo, esto se puede notar sobre las caras de ruedas o discos de la unidad, las picaduras son usualmente un indicativo de la presencia de cloruros.

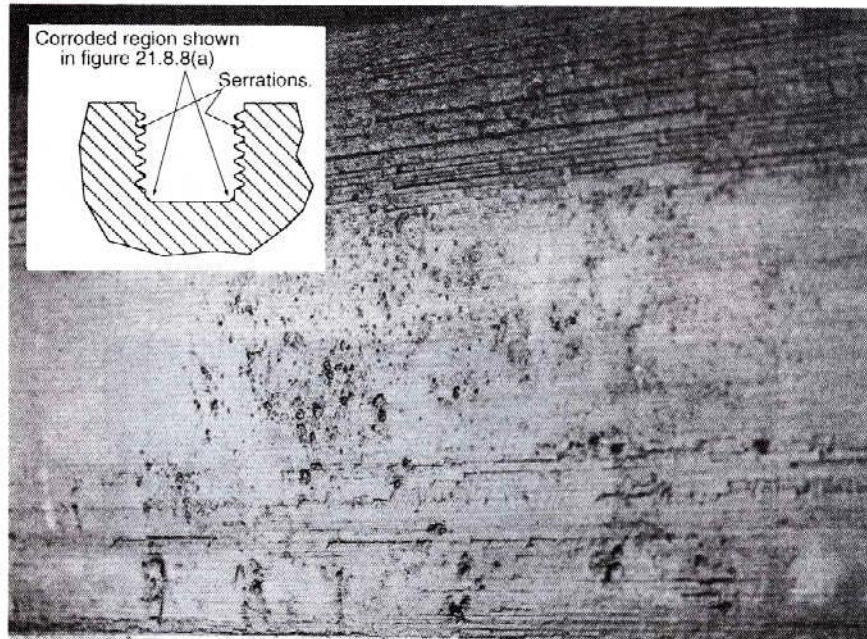
Las picaduras por corrosión son un fenómeno superficial y resulta de una reacción química sobre la superficie del metal. Los huecos que se forman sobre la superficie afectada por este tipo de corrosión son semicirculares, con una profundidad aproximada a la mitad de su propia propagación.

A menudo se presenta la dificultad de encontrar las picaduras por corrosión del tipo mostrado en la figura 17, en esta situación las picaduras aparecen sobre la superficie de la rueda, pero existe muy poca evidencia del material perdido de la raíz de los álabes. Esto muestra que el material de la rueda es más susceptible que el de los álabes.

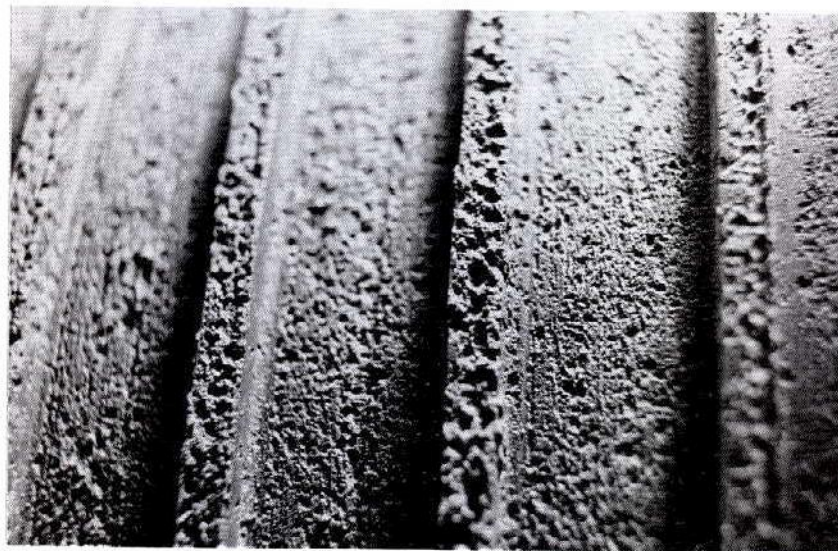


**Figura 23 Picadura de corrosión de la rueda en una etapa**

La figura 18 (a) muestra la base de la raíz, en la cual la erosión indica un ingreso de iones corrosivos y de picaduras por corrosión. Esta forma de corrosión no es considerada tan dañina en esta zona, estas picaduras también son evidentes sobre los bordes dentados mostrados en la figura 18 (b). En estas regiones de alto esfuerzo de tensión pueden ocurrir otros tipos de corrosión. Otra región donde las picaduras por corrosión no son comunes pero sí se presentan son potencialmente causas de daño, son la zona de sellos de los extremos del eje (figura 19).



**Figura 24(a) Corrosión en la raíz del álabe. (b) Se observa la forma de dicha raíz**



**Figura 25 Picaduras por corrosión en el extremo del rotor**

La variación de las condiciones del vapor a través del eje se encuentra en un límite de operación. El cambio en las condiciones térmicas demuestra como el vapor se expande más allá del eje y sellos, y como puede cambiar rápidamente de condiciones húmedas a secas, llegando a sobrecalentado. Por lo tanto, se presentan depósitos sobre el eje, corrosivos y





una posible pérdida de material. Mientras la sección de baja presión esta comprimida, existe un ingreso de aire que promueve la corrosión debido al contenido de oxígeno.

Otro factor a considerar es la fricción entre el rotor y los sellos, lo que provoca un calentamiento local. El enfriamiento del vapor puede producir endurecimiento y como consecuencia una mayor susceptibilidad a los ataques corrosivos adyacentes al endurecimiento superficial.

### **6.5.2 Corrosión bajo esfuerzos (Stress Corrosion Cracking, SCC)**

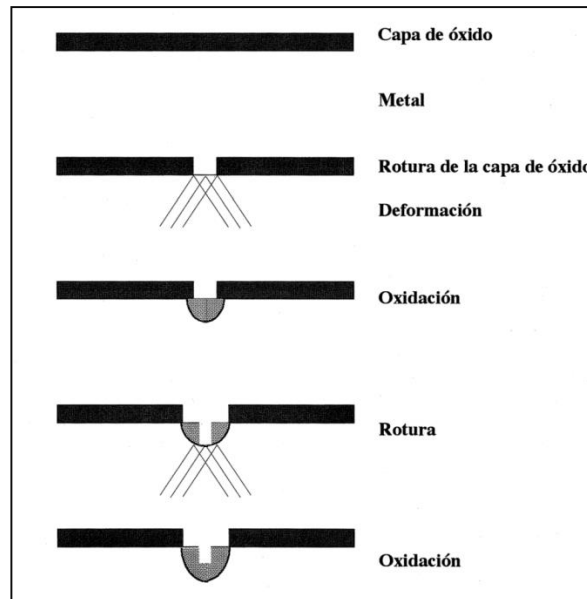
Es un fenómeno por el cual las grietas inician y se propagan a través del material, al romperse la estructura cristalina del material. SCC es una condición relativamente común que se encuentra en las turbinas de vapor, y a menudo afectan los componentes móviles de la unidad, el cual llega a causar fallas catastróficas.

El SCC se presenta en componentes que están bajo una combinación de esfuerzo por tensión y un ambiente corrosivo. Las grietas inducidas por corrosión generalmente son frágiles y con ramificaciones, y pueden ser transgranulares o intergranulares dependiendo de la composición del material, propiedades mecánicas, niveles de esfuerzos locales y medio ambiente.

SCC puede conducir a una falla frágil a esfuerzos relativamente bajos, la tasa a la cual la corrosión es inducida o la formación de grietas, depende del esfuerzo y la temperatura presente influenciada por el ambiente. La iniciación de la grieta se puede llevar periodos extensos del elemento expuesto a un ambiente corrosivo, pero una vez formada la propagación y la falla se presentan dentro de un periodo relativamente corto. Existen muchos componentes en las turbinas de vapor donde se presenta esfuerzo a la tensión residual, ya sea por diseño o bien como consecuencia de la manufactura, en las cuales puede ocurrir un SCC.

Desafortunadamente muchos aceros aleados usados para la construcción de las turbinas son susceptibles a la formación de corrosivos. El acero inoxidable es particularmente susceptible al SCC en ambientes cáusticos y de cloruros.

El SCC comienza con la ruptura de la película protectora de óxido en la superficie del metal por medios mecánicos o por la acción de agentes químicos, tales como iones de cloruro. La ruptura localizada en la superficie de la película lleva a la formación de corrosión por picadura. Los poros, producto de la corrosión que se forman sobre la picadura, restringen el intercambio entre el medio ambiente local dentro de la picadura y el medio ambiente fuera de ella. Por lo tanto, el pH dentro de la picadura es muy diferente al externo, por lo cual es más propenso a la formación de grietas. Las grietas crecen lentamente bajo la condición de SCC hasta que alcanzan su tamaño crítico y entonces ocurre la fractura frágil.



**Figura 26 Mecanismo de ruptura de la película de óxido por SCC**

El SCC resulta como una falla de tipo no dúctil y se puede ser de tipo transgranular o intergranular, lo que depende de diversas variables. Sin embargo, la tasa de crecimiento de una grieta es determinada por el medio ambiente, los niveles de esfuerzos presentes y la temperatura local. Estas dos formas de SCC se describen a continuación:

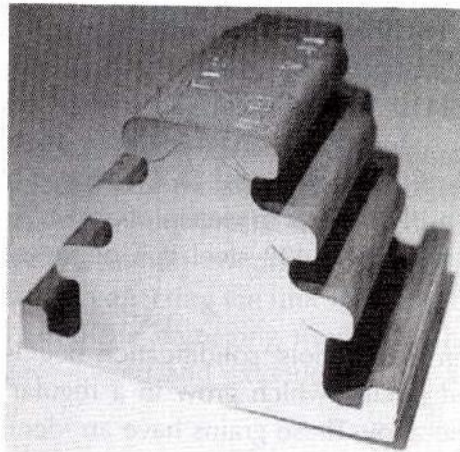
**CORROSIÓN INTERGRANULAR.-** bajo circunstancias normales, la posibilidad que se presentes inconsistencias y deficiencias en los límites de grano son anticipadas y definidas por las propiedades mecánicas del material. Sin embargo, cuando el material de los componentes se produce en un ambiente corrosivo, los límites de grano pueden reactivarse, y corroer principalmente a los cristales puros de la aleación, es decir, los límites de grano pueden desintegrarse a una tasa más rápida que los cristales de aleación. Esto permite el inicio y crecimiento de una grieta entre ellos. Bajo estas circunstancias, los cristales puros de aleación no se verán afectados pero eventualmente pueden romperse desde la estructura del material sólido.

La corrosión que ataca a los límites de grano es llamada "intergranular corrosion". Tal corrosión resulta de la desintegración de los aleados en los límites de grano, posiblemente dejando pequeños cristales de la base aleada, separados del sólido. El agrietamiento intergranular es un mecanismo común que conduce a fallas dentro de la turbina de vapor. Las películas de protección en la base de la grieta son continuamente rotas por el esfuerzo local con granos que no son afectados por los iones corrosivos presentes en las grietas.

Las grietas pueden ser de forma ramificada o pasar directamente a través del material. En la figura 21 se presenta una sección fracturada de la rueda de una turbina, donde entra

la raíz del álabe. Esta porción de la rueda ha sufrido una fractura intergranular iniciando en la esquina del radio del filete. La figura 22 es una micrografía de la sección transversal de la grieta.

La corrosión intergranular ocurre muy a menudo en las regiones que han sido sujetas a algún tratamiento térmico, la aplicación de algún relevado de esfuerzos puede reducir la posibilidad de este tipo de daño.



**Figura 27** Grietas por SCC sobre una sección de la rueda



**Figura 28** Sección transversal de un componente que ha fallado, debido a grietas intergranulares por SCC

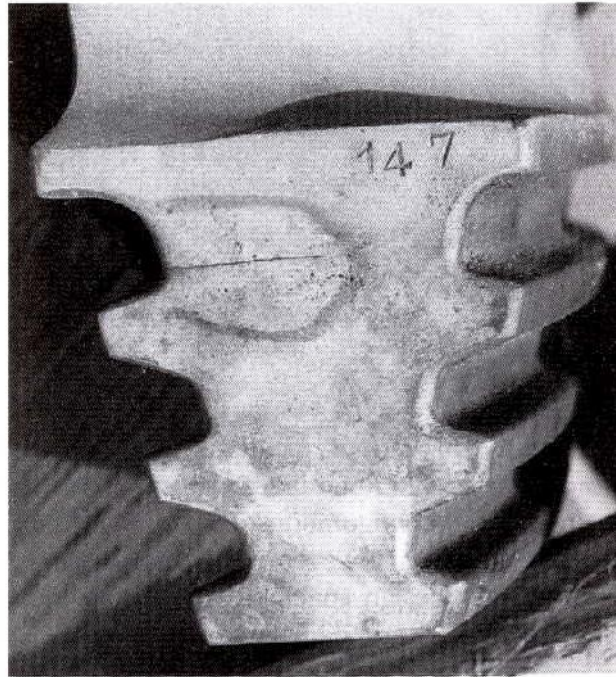
**CORROSIÓN TRANSGRANULAR.**- la corrosión transgranular es menos común que la intergranular, pero ocurre bajo ciertas circunstancias dentro de los materiales donde el vapor circula. El acero austenítico es más susceptible a este tipo de daño.

A diferencia de las grietas intergranulares, las transgranulares inician en la superficie de los cristales aleados. Éstas se propagan en una serie de pasos discretos, ya que hay un clivaje de los granos individuales, las grietas atraviesan por el plano del cristal. El crecimiento de la fractura es interrumpido cada vez que se llega al límite de grano, por lo que la grieta inicia nuevamente. Este clivaje de grietas en los cristales representa una fractura frágil a través de los cristales individuales de la aleación.

La figura 23 muestra una grieta transgranular en el radio del filete de la raíz de un álabe. En la figura 24 se muestra una raíz de entrada axial con una grieta claramente visible. Una examinación de los depósitos de la superficie de la raíz indica la existencia de un alto contenido de sulfuro y del agente corrosivo de sulfuro de hidrogeno ( $H_2S$ ).



**Figura 29 Grieta transgranular en la raíz de un álabe**



**Figura 30** *Iniciación de una grieta en la raíz de un álabe*

Suponiendo que los granos del metal son pequeños, la probabilidad de la propagación de una grieta transgranular se reduce significativamente. Desafortunadamente el mecanismo exacto de un agrietamiento transgranular no ha sido completamente comprendido.

Las etapas de las turbinas que probablemente son las más afectadas por el SCC son las de baja presión donde la humedad de condensación comienza a formarse. Estas regiones son más susceptibles a este problema ya que se encuentran bajo altos esfuerzos de tensión y como consecuencia una concentración de esfuerzos.

La acción corrosiva que ocurre al paro (cuando no hay fuerza centrífuga) es principalmente por picadura. Los huecos producen una concentración de esfuerzos y agrietamiento cuando el equipo regresa a servicio. Sin embargo, existen partes donde el esfuerzo por tensión está presente incluso en el paro.

La forma de la raíz de los álabes puede introducir esfuerzos por tensión según sea el diseño. Esto incluye la cercanía de los álabes en algunas filas, la cual se encuentra ligada a la configuración, la fuerza de apriete lateral entre los mismos también introduce esfuerzo a la tensión. Sin embargo, si todos estos parámetros de diseño se controlan en sus valores específicos, el esfuerzo inducido puede ser suficientemente bajo que no resulte dañino.

Entre la superficie del rotor y el hueco de la rueda, existe una región donde el SCC resulta una preocupación. Un área común para la iniciación de una grieta es el cuñero. El cuñero representa la principal discontinuidad y es el lugar más común donde las grietas



inician. Muchos de los nuevos diseños de cuñas buscan minimizar los efectos de la concentración de esfuerzos.

### 6.5.3 Corrosión por desgaste

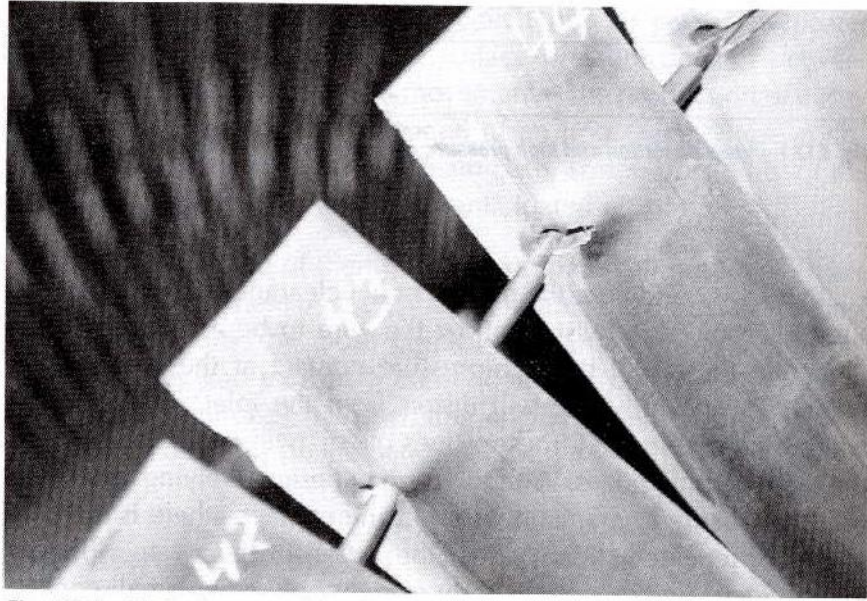
La corrosión por desgaste se presenta cuando existe un movimiento relativo entre dos superficies nominalmente en estrecho contacto. Este movimiento puede ser por contactos repetidos de alta frecuencia entre superficies o bien de deslizamiento repetidos de alta frecuencia de una superficie respecto a otras. El movimiento por deslizamiento induce altas temperaturas en las superficies de contacto, lo cual resulta en oxidación de los puntos con la más alta temperatura. El daño ocasionado se presenta en forma de picaduras u otras discontinuidades mecánicas en la superficie del material produciendo concentración de esfuerzo y la iniciación de una falla por fatiga de altos ciclos.

La corrosión por desgaste es un mecanismo que induce daño y pérdida de material superficial, pero no depende de la presencia de un agente corrosivo para producir daño. El rápido y repetido movimiento que induce el desgaste es similar a la forma de movimiento que produce la fatiga por altos ciclos. Por lo tanto cuando ocurre el desgaste por corrosión en una turbina también puede existir una falla por fatiga por altos ciclos. El desgaste se presenta sobre superficies en movimiento repetitivo constante y no en movimiento continuo. Esta forma de desgaste es necesaria para que el calor aumente de tal manera que pueda causar la oxidación.

El proceso de desgaste se basa en el movimiento relativo entre una superficie metálica u otra con la cual existe contacto (impacto repetido o deslizamiento), y una superficie de alta presión. La consecuencia de este movimiento es la producción de superficies excesivamente calientes y la formación de óxido de hierro. Esta condición se puede presentar en todos los lugares por donde pasa el vapor a través de la turbina.

Los componentes dañados por este mecanismo son los siguientes:

Agujero de alambre.- la región más común donde se presenta este fenómeno es el punto por el cual pasa un alambre a través de un orificio perforado en el álabe. Para que el desgaste ocurra se requiere un desalineamiento entre el alambre y el orificio en la zona de alta presión. Un ejemplo de este daño se muestra en la figura 25, aquí se observa la mala alineación del álabe, lo que produjo la falla y la pérdida de material, causando un alargamiento del orificio en dirección axial.



**Figura 31** *Álabes con un alargamiento en el orificio*

Raíz del álabe.- la función principal de la raíz de un álabe es la sujeción del álabe por lo cual debe ser capaz de soportar las cargas generadas en el álabe. Las superficies de transferencia de carga de dichas raíces están sujetas a cargas que pueden producir desgaste si los álabes no son montados a la rueda de tal manera que no exista un movimiento relativo entre las superficies de contacto, ya que de lo contrario el elemento puede fallar.

## 7 PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS

### 7.1 ANTECEDENTES

El presente estudio consiste en la realización de un análisis de falla en una turbina vapor, la cual presenta una fractura visible en el disco de la quinta etapa a la altura del candado de seguridad de los álabes. El disco de la etapa cinco está fracturado totalmente en la parte de la guía para álabes (ver anexo 1). Además se analizó el disco de la etapa número 4 la cual presenta también visiblemente una fractura en orificio del barreno para el candado y fractura saliendo del barreno de la muñeca para sujeción con el eje del rotor (ver anexo 6).

Esta muestra pertenecía a una turbina que había fallado después de un año y 3 meses de operación aproximadamente, cuando la vida media de este equipo es de 20 años.

El material utilizado para construcción del disco de la quinta etapa de la turbina de acuerdo con las especificaciones era acero AISI 4340 el cual fue sometido a tratamiento térmico de temple y revenido, partiendo de un material normalizado. Posterior al tratamiento térmico, el disco fue sometido a un tratamiento de relevado de esfuerzos.

Las propiedades mecánicas reportadas por el fabricante del disco son: 1078.892 MPa de esfuerzo máximo a la tensión; 992.7761 MPa de esfuerzo a la cedencia, y un alargamiento de 15%.

Por otra parte el disco de la cuarta etapa no se tiene información sobre el material de construcción, inicialmente se supone que debe ser igual al de la quinta que es un AISI 4340, el cual tuvo el mismo tratamiento térmico. Dentro del informe se especifica lo encontrado con respecto al material. (ver anexo 7)

Se sabe que estos discos estaban en una atmósfera de vapor de agua con una temperatura aproximada de 170°C y se entregó la composición química del agua a partir de la cual se generaba el vapor de agua. La composición química del agua es mostrada en la tabla siguiente:

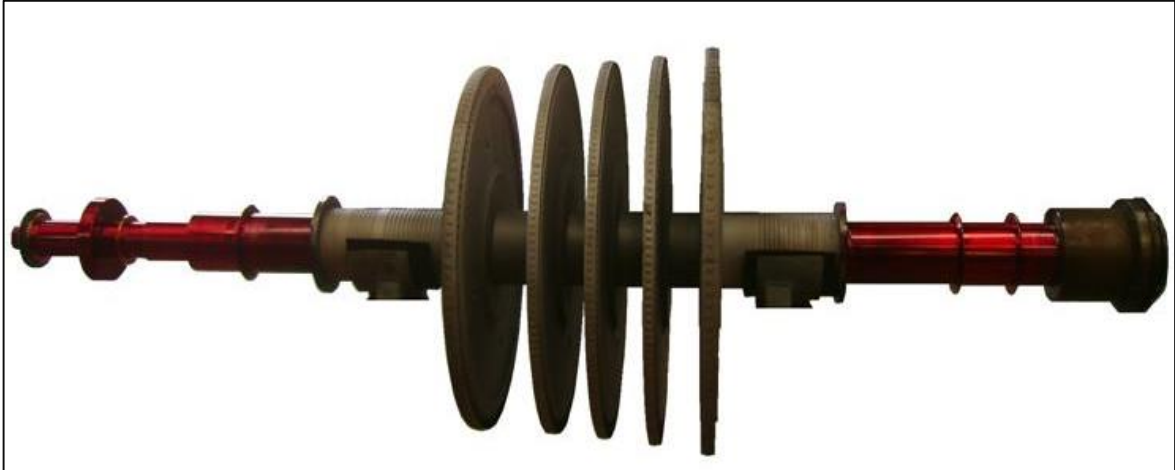
**Tabla 4 Composición del agua**

CLAVE MUESTRA	LOTE	SUBLOTE	Pb	Fe	Zn	As	Cd	Se	Na	Ca	Mg	Ba	Cl	F	SO4	SS	SiO2	NO3	ST
			ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	g/L	ppm	ppm	g/L
CMENS TA	CALDERAS	ABRIL	-0.01	0.03	0.03	-0.01	-0.01	0.06	0.65	0.20	-0.01	-0.01	0.75	0.16	0.30	0.004	0.42	0.58	0.01
CMENS TA	CALDERAS	MAYO	0.02	0.15	0.15	0.01	0.01	0.06	1.12	0.92	0.03	-0.01	0.96	0.16	0.64	0.002	0.24	0.49	0.03
CMENS TA	CALDERAS	JUNIO	-0.01	0.03	0.14	-0.01	0.01	0.39	1.98	0.16	0.07	-0.01	0.93	0.10	0.62	0.016	0.91	0.66	0.01
CMENS TA	CALDERAS	JULIO	-0.01	-0.01	0.03	-0.01	0.01	0.12	1.93	-0.01	-0.01	-0.01	0.64	-0.01	0.36	0.004	0.71	0.28	0.04
CMENS TA	CALDERAS	AGOSTO	0.01	-0.01	0.29	0.01	0.06	0.03	0.04	0.32	-0.01	-0.01	0.42	-0.10	3.43	0.002	0.49	0.30	0.02
CMENS TA	CALDERAS	SEPTIEMBRE	-0.01	-0.01	0.61	-0.01	0.02	0.01	1.39	0.51	0.33	-0.01	0.63	-0.10	2.64	0.002	0.39	0.88	0.04
CMENS TA	CALDERAS	OCTUBRE	-0.01	-0.01	0.02	-0.01	-0.01	0.02	2.38	0.04	0.02	-0.01	0.49	-0.01	0.25	0.002	0.44	0.23	0.01
CMENS TA	CALDERAS	NOVIEMBRE	-0.01	0.01	0.07	-0.01	0.01	0.02	1.04	0.25	0.03	-0.01	0.76	0.08	0.76	0.008	0.29	1.00	0.02
<b>PROMEDIOS</b>			<b>-0.003</b>	<b>0.021</b>	<b>0.159</b>	<b>-0.001</b>	<b>0.011</b>	<b>0.086</b>	<b>1.186</b>	<b>0.268</b>	<b>0.053</b>	<b>-0.009</b>	<b>0.603</b>	<b>0.025</b>	<b>1.030</b>	<b>0.004</b>	<b>0.450</b>	<b>0.428</b>	<b>0.020</b>
CMENS TA	CALDERA	ENERO	0.01	0.01	0.28	0.01	0.07	0.08	0.03	0.07	0.02	0.01	1.00	0.10	3.00	0.002	-0.01	1.00	0.008



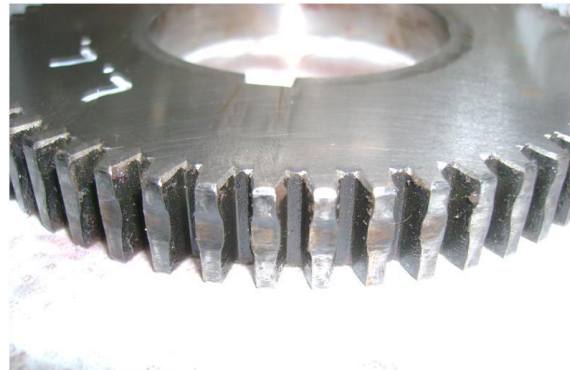
## 7.2 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA

El rotor completo fue inspeccionado por varios ensayos no destructivos e inspecciones visuales donde se obtuvieron los siguientes comentarios relevantes:



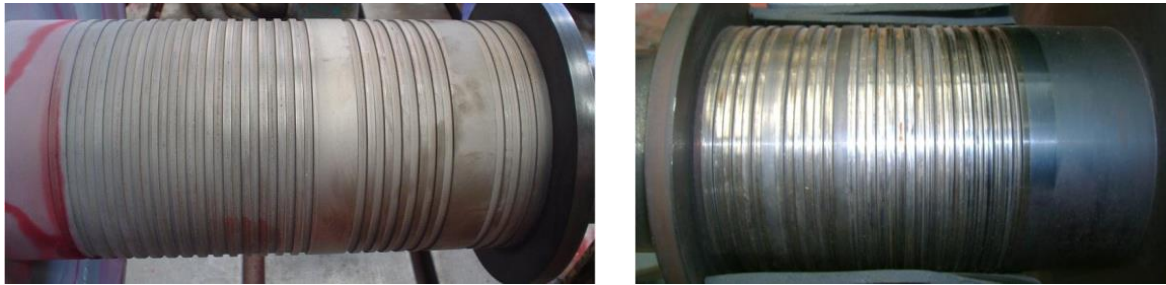
**Figura 32 Rotor de la turbina de vapor**

1. Los dos muñones para chumaceras presentan rayas por trabajo, de mayor profundidad en el muñón lado gobernador.
2. El engrane para tacómetro tiene deformación por arrastre en la superficie radial de los dientes.



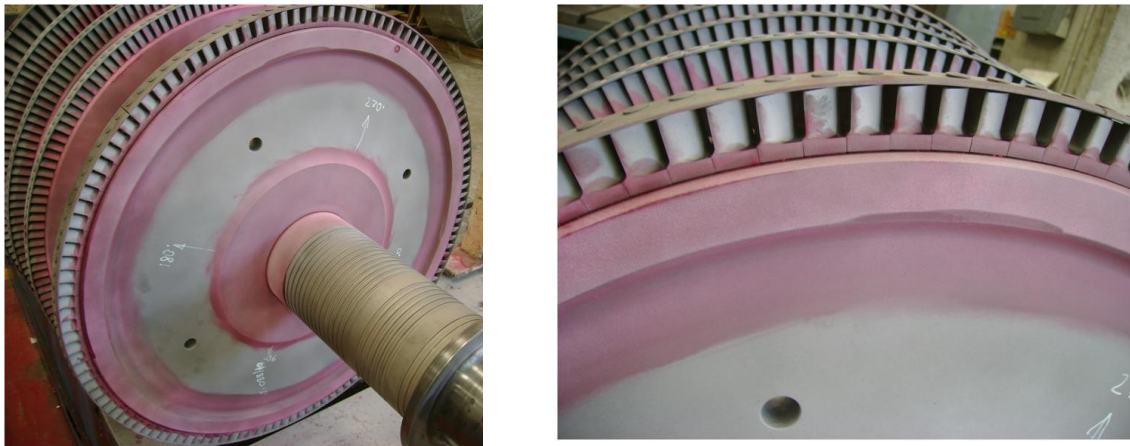
**Figura 33 Engrane para sensor de velocidad con arrastre en dientes y fuerte deformación**

3. Las zonas para sello de vapor tanto al lado cople como al lado gobernador tienen marcas profundas por arrastre.

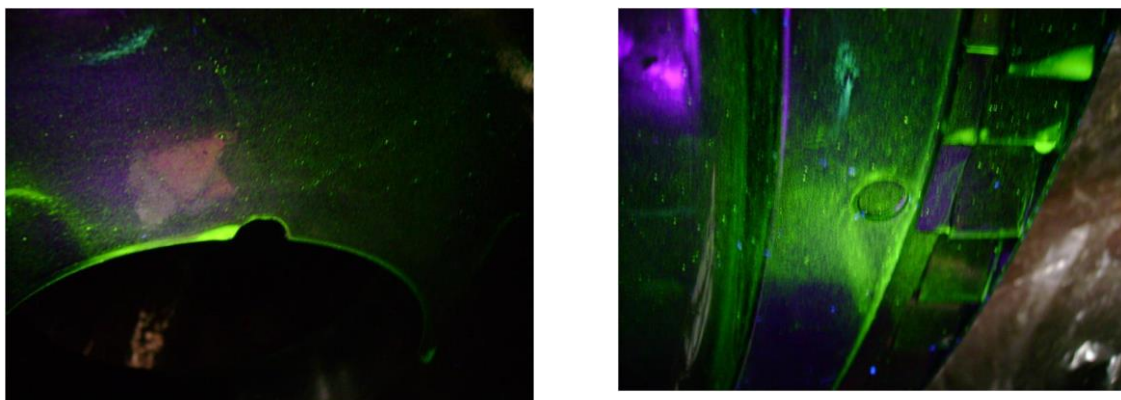


**Figura 34 Zona de sellos laberínticos de ambos lados con crestas deformadas por arrastre**

4. El disco del primer paso presenta arrastre en borde de anclaje de los álabes a la entrada de vapor. Los álabes tienen picaduras aisladas por corrosión, algunos de ellos con golpe superficial. Un segmento de banda ubicado entre  $180^\circ$  y  $270^\circ$  está levantado a simple vista, además la situación de las bandas de agrupamiento de los otros álabes tienen espacio entre la superficie radial de la mayoría de los álabes y bandas, en resumen todas las bandas están levantadas presentando poco ajuste respecto al tetón de los álabes. Pero no presentan ningún daño significativo.

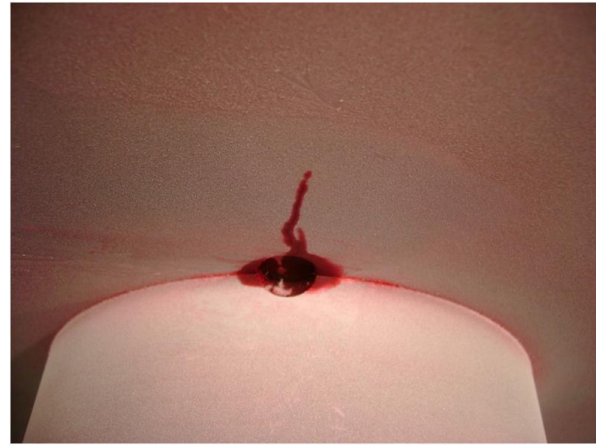


**Figura 35 Disco del primer paso con arrastre en el borde y bandas levantadas con poco ajuste**



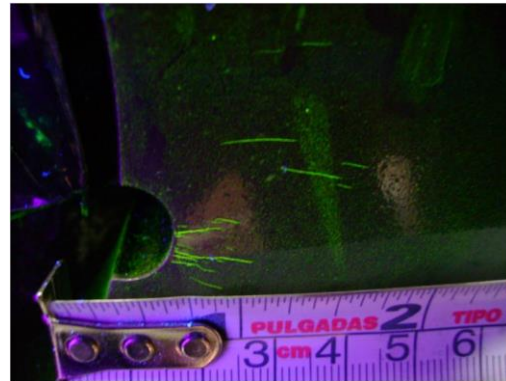
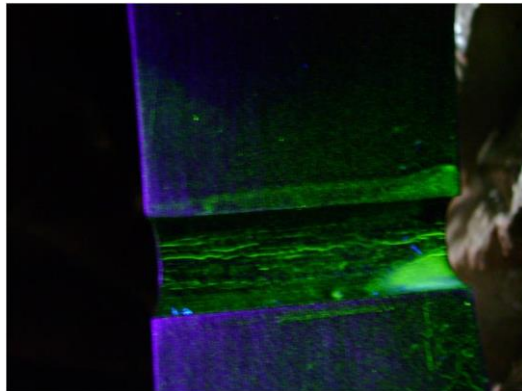
**Figura 36 Cuñero y barreno del perno de seguro no presenta daños aparentes**

- En el disco de la segunda etapa se aprecia arrastre axial con material impregnado a la entrada de vapor sobre el borde de anclaje de los álabes, el disco está fisurado a partir del cuñero con longitud de fisura de 2" aprox. y bifurcación de la misma, los álabes se aprecian en buen estado, tres de ellos tienen pequeño desprendimiento en el tetón.



**Figura 37 Fisura saliendo desde el cuñero de aproximadamente 2" de largo**

- En el disco de la tercera etapa existe arrastre axial con material impregnado a la entrada de vapor sobre el borde de anclaje de los álabes. Se detectan indicaciones múltiples de fisura cerca del diámetro interior y fisuras salientes desde el cuñero y sobre el ancho del mismo, algunas de las fisuras alcanzan longitudes de 0.300" a 0.400".

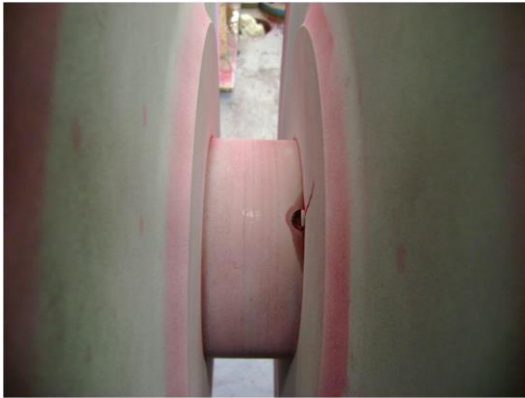


**Figura 38 Fisuras sobre el ancho del cuñero y salientes del mismo**

- En el disco de la cuarta etapa existe arrastre axial con material impregnado a la entrada de vapor sobre el borde de anclaje de los álabes, la sección de cierre presenta fisura saliente desde el barreno del perno, el bandaje tiene golpes aislados y presenta cierta holgura en su remachado con los tetones de los álabes, 5 bandas están fisuradas y una está levantada, 6 tetones de los álabes están dañados, además presenta fisura saliendo de cuñero con una longitud aproximada de 2.5".

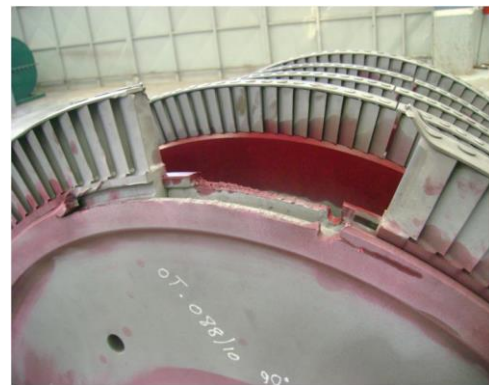
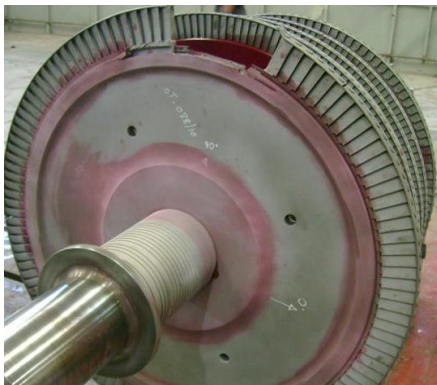


**Figura 39 Fisuras en bandas y en el barreno del perno de seguro**



**Figura 40 Fisura saliendo del cuñero**

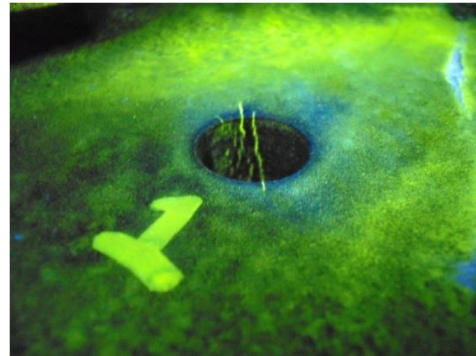
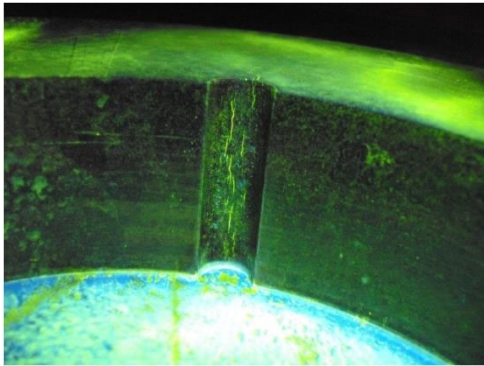
8. En el disco de la quinta etapa hay presencia de grietas en el cuñero, en los cuatro barrenos de equilibrio y en el borde de anclaje de los álabes, una sección del disco incluyendo 9 álabes en la sección de cierre están desprendidas por fractura.



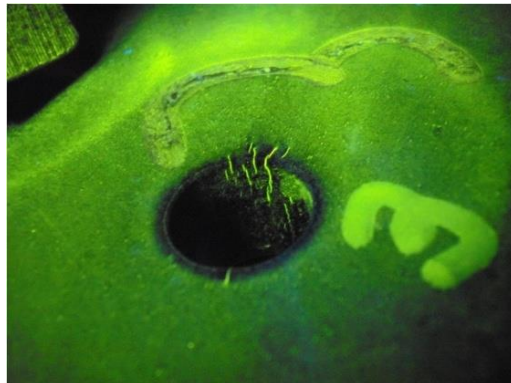
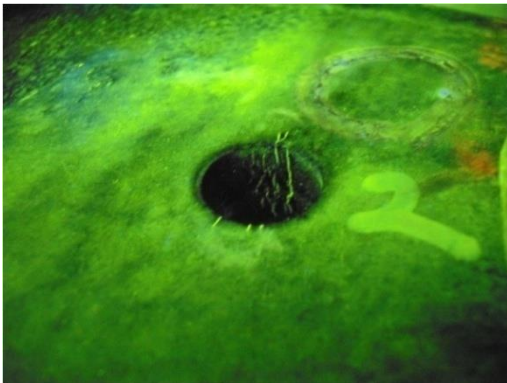
**Figura 41 Sección de álabes desprendida por fractura**



**Figura 42 Detalle de la fractura en el disco**

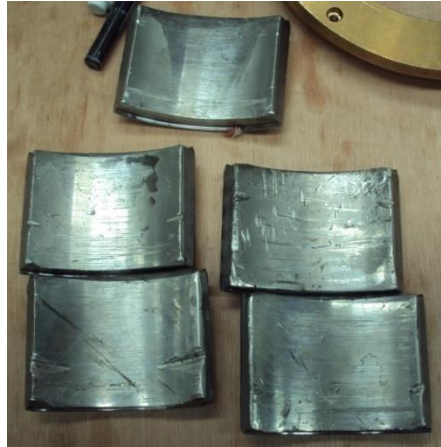


**Figura 43 Fisuras a lo ancho del cuñero y en los barrenos de equilibrio**



**Figura 44 Fisuras en barrenos de equilibrio**

9. La chumacera lado libre presenta: de las cinco zapatas, dos presentan fuerte arrastre, en todas existen fuertes golpes.



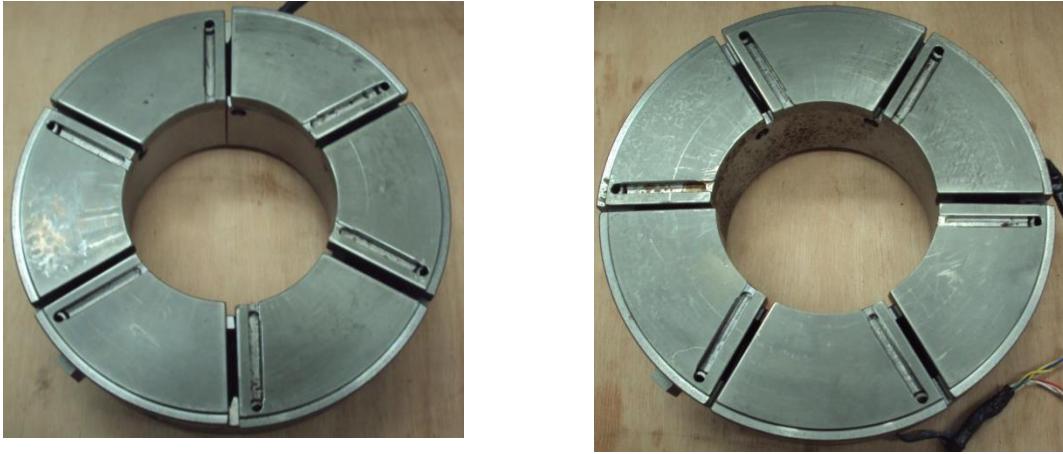
**Figura 45 Chumaceras radiales, lado libre con fuerte arrastre**

10. Las cinco zapatas de la chumacera del lado del cople presentan desgaste por arrastre al centro, fragmentos metálicos incrustados y una de ellas con fisura en babbitt.



**Figura 46 Chumaceras radiales, lado cople con desgaste por arrastre**

11. Las chumaceras axiales lado activo e inactivo presentan rayas por arrastre y marcas leves de impactos en el metal babbitt e incrustación de contaminantes embebidos en el babbitt.



**Figura 47 Chumaceras axiales con rayas por arrastre**

### **7.3 INSPECCIÓN VISUAL DISCO 5**

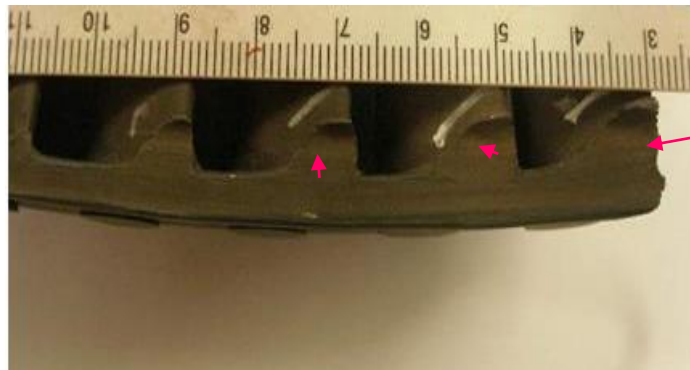
Los especímenes para estudio que fueron entregados para el análisis de falla son mostrados en el anexo 1. Los resultados de esta técnica son los siguientes:

- A) La muestra presenta dos superficies de fractura.
- B) Una de las superficies de fractura está cubierta por una capa de productos de corrosión roja.
- C) El origen de la fractura se ubica en el barreno del disco de la turbina.
- D) Existe deformación plástica en el fondo del barreno.
- E) Existe evidencia de deformación en la fractura en la región de los bordes del barreno.
- F) El final de la fractura presenta una deformación plástica.
- G) Existe evidencia de desgarradura en la base de los álabes.
- H) Existe evidencia de un trozo de metal completamente deformado en el borde del disco de la turbina.



**Figura 48** Marcas de un objeto metálico deformado fue encontrado en la muestra

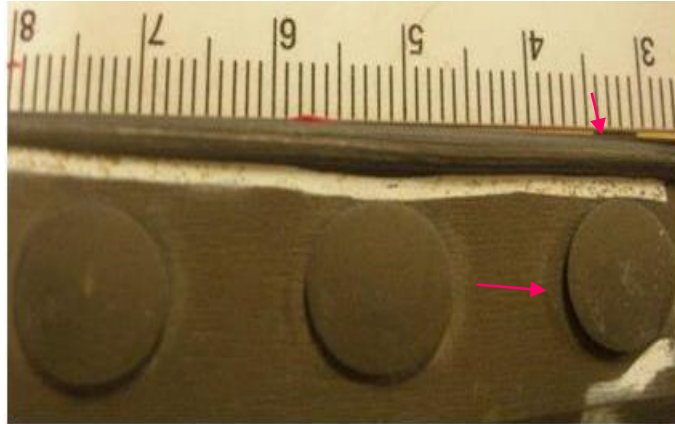
- I) Existe deformación plástica en las esquinas de uno de los álabes.
- J) Existe evidencia de desgaste por talladura no uniforme en la base de los álabes (ver figura 43).



**Figura 49** Cara de los álabes, se observa la existencia de deformación plástica por talladura

- K) Uno de los tetones de los álabes tiene una mayor altura que los otros





**Figura 50 Tetones de los álabes existentes, se puede observar uno de ellos más elevado y una deformación existente**

- L) Existe evidencia de mediciones de dureza en unas regiones de la canaleta del disco de turbina.

Las evidencias de las aseveraciones hechas anteriormente son presentadas en el anexo 1 de este informe.

#### **7.4 ANÁLISIS QUÍMICO DISCO 5**

A fin de determinar la composición química, una muestra representativa del material del disco de turbina fue preparada para análisis químico cuantitativo por medio de la técnica de espectroscopía de emisión óptica y de la técnica de combustión.

La composición química encontrada es de un acero AISI 4340. Los resultados son presentados en el anexo 2 de este informe.

#### **7.5 ANÁLISIS METALGRÁFICO DISCO 5**

Por medio de cortes mecánicos se obtuvieron muestras metálicas representativas del material del disco de la turbina. Las muestras fueron lijadas con papel abrasivo de grano 120, 180, 240, 320, 600 y 1200; después de lo cual fueron pulidas con alumina hasta un nivel de 0.05 micras (Pulido espejo), posteriormente fueron atacadas con nital al 2 % para revelar la microestructura del material del núcleo de acero al carbono. Las muestras fueron observadas utilizando un microscopio óptico, de dichas observaciones se encontró lo siguiente:



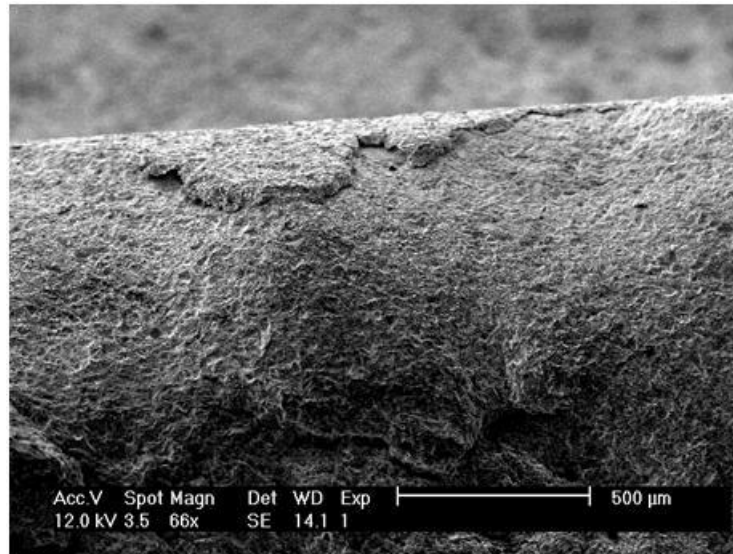
- A) La microestructura del material del disco de turbina consiste de una matriz de martensita revenida, pequeñas regiones de austenita retenida, inclusiones no metálicas y carburos precipitados (algunos formando cadenas).
- B) El nivel de inclusiones no metálicas en la microestructura del acero es elevado.
- C) Existe evidencia de inclusiones en cadena y otras formando cúmulos (clusters).
- D) Existen grietas secundarias en la superficie de la fractura.
- E) Existen grietas secundarias que no tienen un origen superficial.
- F) Existen grietas que tienen origen superficial y crecen hacia dentro del material.
- G) Existen microgrietas con origen en las inclusiones no metálicas.
- H) En unas de las grietas secundarias existen inclusiones no metálicas.
- I) No se observa la presencia de crecimiento del grano austenítico.
- J) No se observa la presencia de segundas fases precipitadas.
- K) No existe evidencia de decarburación.

Las evidencias de las aseveraciones anteriores son mostradas en el anexo 3 del presente informe.

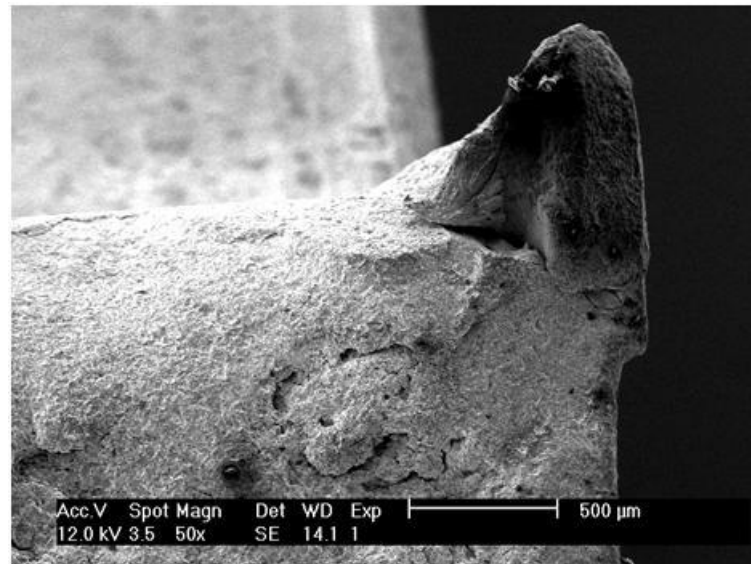
## 7.6 ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) DISCO 5

Una inspección por medio de microscopía de barrido electrónico (MEB) fue llevada a cabo sobre la superficie fracturada de la grieta encontrada en uno de las guías de álabes decapados de acero; esto con el fin de conocer el mecanismo de origen y crecimiento de la grieta. Sin embargo, debe mencionarse que para realizar el análisis fractográfico por medio de MEB, se requirió de limpiar la muestra por medio de ultrasonido en baño de alcohol isopropílico. De dichas observaciones se encontró lo siguiente:

- A) La superficie de fractura tiene un patrón intergranular.
- B) Existe evidencia de daño mecánico (talladuras) en la superficie del barreno que es origen de la fractura (figuras 45 y 46).



**Figura 51 Superficie de fractura en el borde del barreno, se observa daño mecánico**



**Figura 52 Superficie de fractura en el borde del barreno**

- C) Existe evidencia de inclusiones no metálicas entre las agujas de martensita.
- D) Existen microgrietas originadas en las inclusiones no metálicas encontradas.
- E) EL microanálisis EDX revela la existencia de Cobre en los granos de la superficie de fractura.



- F) EL microanálisis EDX revela la existencia de cobre en una de las grietas secundarias.
- G) Existe evidencia de precipitación en los límites de grano austenítico cerca de una grieta secundaria

Los resultados del análisis por microscopía electrónica de barrido se muestran en el anexo 4 de este informe.

### **7.7 MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DISCO 5**

Con el fin de determinar las propiedades mecánicas del material de la turbina por medio de ensayo a la tensión, tres probetas de ésta fueron cortadas y manufacturadas.

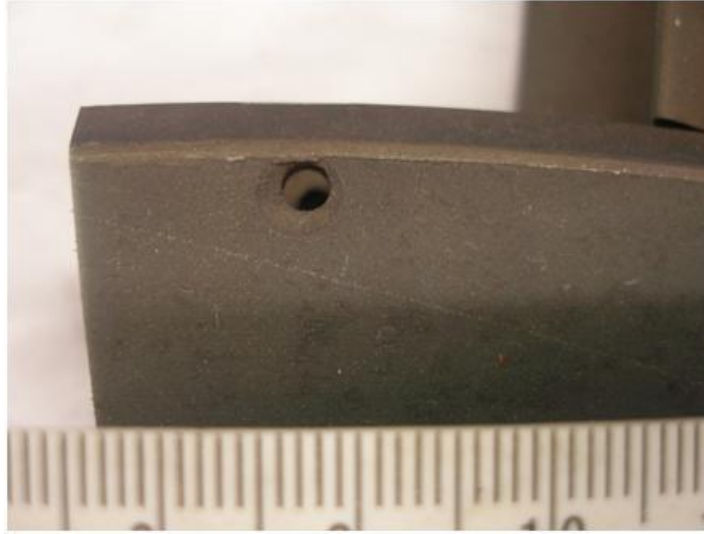
Los resultados del ensayo a la tensión indican que la resistencia máxima a la tensión (promedio) es de 1116 MPa. y el esfuerzo de cedencia (promedio) es de 1030 MPa. Por otro lado el alargamiento (promedio) es de 7.0 %.

Los resultados de la medición del perfil de dureza son mostrados en el anexo 5 de este informe.

### **7.8 INSPECCIÓN VISUAL DISCO 4**

El disco 4 para estudio es mostrado en el anexo 6. Se puede observar que la muestra presentaba daño mecánico. Los resultados de esta técnica son las siguientes:

- A) La muestra presenta dos grietas con origen en el barreno.
- B) La fractura no es total.
- C) La fractura solo ocurrió en un lado de la canaleta.
- D) El barreno donde se originaron las grietas no es concéntrico respecto al avellanado.
- E) El barreno donde se originaron las grietas presenta deformación plástica en la región superior.



**Figura 53 Barreno del disco de la turbina en la parte contraria de la fractura, se observa la existencia de un desfasamiento entre el barreno y el avellanado, además de una deformación plástica en la parte superior del barreno**

- F) Existe deformación por daño mecánico en uno de los álabes.
- G) Uno de los remaches de los álabes no está sujeto a su posición.
- H) El patrón de la bandas de forjado es unidireccional.
- I) Existe una grieta con origen en uno de los radios de la canaleta.
- J) Existe evidencia de deformación en la parte superior del disco en la región donde se ubica la grieta.
- K) Existe evidencia de golpes en la parte superior del disco en la región donde se ubica la grieta.
- L) No se observa evidencia de productos de corrosión en el disco.
- M) La superficie de fractura está cubierta por una capa de productos de corrosión.

Las evidencias de las aseveraciones hechas anteriormente son presentadas en el anexo 6 de este informe.



## 7.9 ANÁLISIS QUÍMICO DISCO 4

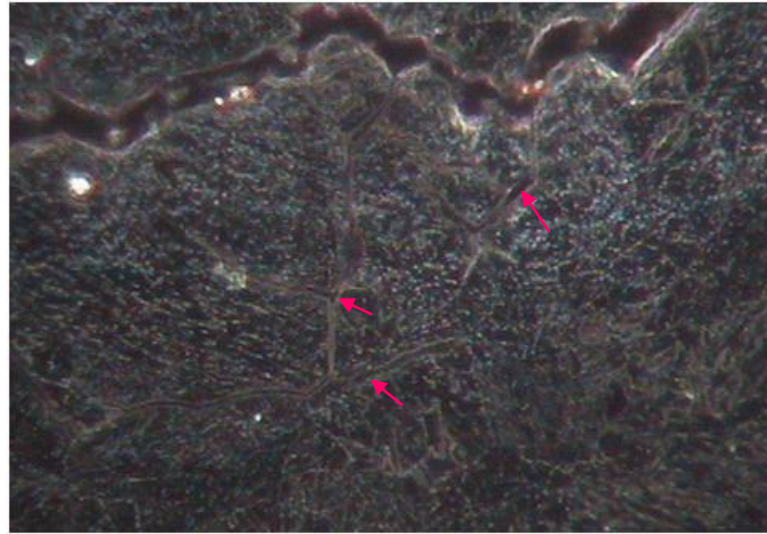
A fin de determinar la composición química, una muestra representativa del material del disco de turbina fue preparada para análisis químico cuantitativo por medio de la técnica de espectroscopia de emisión óptica.

El disco de la cuarta etapa no tiene especificaciones por el fabricante, por lo cual se supone que es del mismo material al de la quinta etapa, un acero AISI 4340; pero la composición química encontrada mediante espectrometría de emisión óptica indica una composición que coincide con la de un acero 8615. Los resultados son presentados en el anexo 7 de este informe.

## 7.10 ANÁLISIS METALGRÁFICO DISCO 4

Por medio de cortes mecánicos se obtuvieron muestras metálicas representativas del material del disco 4 de turbina. Las muestras fueron lijadas con papel abrasivo de grano 120, 180, 240, 320, 600 y 1200; después de lo cual fueron pulidas con alumina hasta un nivel de 0.05 micras (Pulido espejo), posteriormente fueron atacadas con nital al 2 % para con ello revelar la microestructura del material del núcleo de acero al carbono. Las muestras fueron observadas utilizando un microscopio óptico. De dichas observaciones se encontró lo siguiente:

- A) La microestructura del material del disco de turbina consiste de una matriz de bainita, inclusiones no metálicas, y carburos precipitados (algunos formando cadenas).
- B) Existen grietas secundarias en la superficie de fractura.
- C) Los carburos forman cadenas que delimitan el grano austenítico.
- D) Existe evidencia de inclusiones no metálicas en la matriz de bainita.
- E) No existe evidencia de huecos por forjado en las inclusiones no metálicas detectadas.
- F) Existe una grieta con origen en el radio de la canaleta.
- G) La grieta detectada crece de manera frágil.
- H) Los granos austeníticos cercanos a la grieta presentan decohesión.



**Figura 54** Micrografía a 100X muestra la microestructura del disco 4 en la cercanía de la grieta del radio de la canaleta. Se pueden observar carburos precipitados y decohesión entre los granos austeníticos

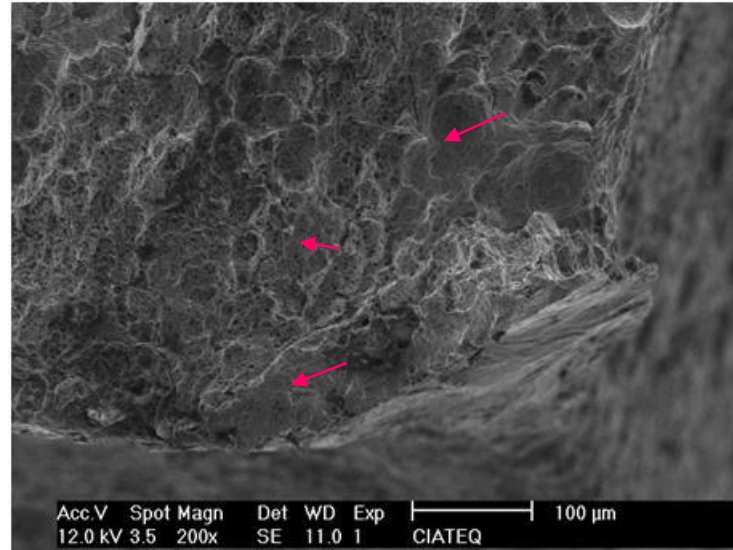
- I) No se observa la presencia de crecimiento del grano austenítico.
- J) No se observa la presencia de segundas fases precipitadas.
- K) No existe evidencia de picaduras por corrosión.
- L) No existe evidencia de decarburación.

Las evidencias de las aseveraciones anteriores son mostradas en el anexo 8 del presente informe.

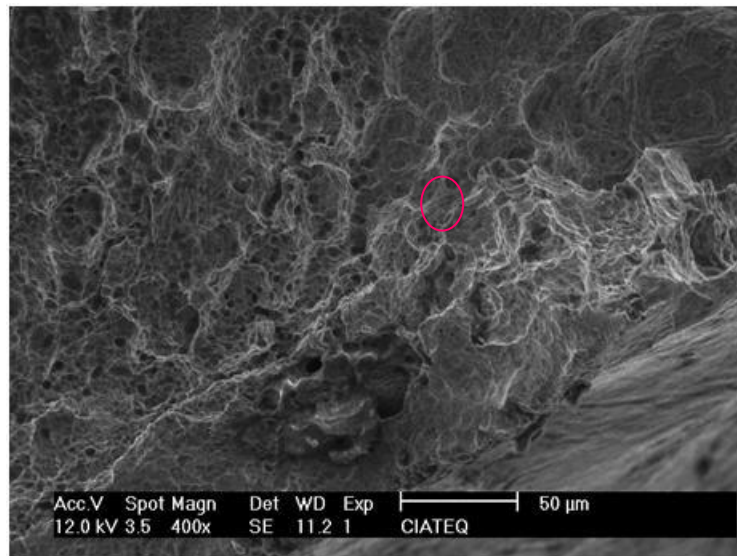
### **7.11 ANÁLISIS POR MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) DISCO 4**

Una inspección por medio de microscopía de barrido electrónico (MEB) fue llevada a cabo sobre la superficie fracturada de la grieta encontrada en el disco 4 de la turbina; esto con el fin de conocer el mecanismo de origen y crecimiento de la grieta. Sin embargo, debe mencionarse que para realizar el análisis fractográfico por medio de MEB, se requirió de limpiar la muestra por medio de ultrasonido en baño de alcohol isopropílico, agua, y ácido acético. De dichas observaciones se encontró lo siguiente:

- A) El origen de la grieta se ubica en el barreno.
- B) El patrón de fractura en el inicio de la grieta (borde del barreno) es de tipo cuasiclivaje.



**Figura 55** La imagen MEB muestra el origen de la fractura en el barreno. Se puede observar un patrón de tipo cuasiclivaje en el origen de la fractura y una inclusión no metálica



**Figura 56** La imagen MEB muestra el origen de la fractura en el barreno. Se puede observar un patrón de tipo cuasiclivaje en el origen de la fractura y una inclusión no metálica, además del lugar donde se llevó a cabo el microanálisis EDS 1

- C) Existen grietas secundarias paralelas a la grieta principal con origen en el barreno.
- D) La superficie de fractura en el crecimiento de la grieta tiene un patrón tipo intergranular.





- E) El microanálisis EDS llevado a cabo en la superficie de fractura indica la presencia: de Hierro (Fe), Cromo (Cr), Silicio (Si), Manganeso (Mn).
- F) Existe evidencia de inclusiones no metálicas en la superficie de la grieta.

Los resultados del análisis por microscopía electrónica de barrido se muestran en el anexo 9 de este informe.

### **7.12 MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DISCO 4**

Con el fin de determinar las propiedades mecánicas del material del acero del disco de la turbina por medio de ensayo a la tensión. Los resultados del ensayo a la tensión indican que la resistencia máxima a la tensión (en promedio) es de 822.27 MPa. y el esfuerzo de cedencia (en promedio) es de 755.98 MPa y el alargamiento (promedio) es de 17.33 %.

El perfil de microdureza fue medido paralelamente a la grieta detectada en el radio de la canaleta, y en la contraparte sin fractura. En el núcleo de ambos perfiles la dureza es similar (alrededor de 26 HRC), pero en el caso del origen de la grieta la dureza es ligeramente mayor (alrededor de 30 HRC).

Por otro lado, un análisis fractográfico de la superficie de fractura fue llevado a cabo en una de las probetas de tensión, encontrándose que existía un modo de falla dúctil por hoyuelos de fractura (dimples) y en unas regiones un modo de clivaje. Estos resultados son discutidos más adelante.

Los resultados de las pruebas mecánicas son mostrados en el anexo 10 de este informe.

### **7.13 SIMULACIÓN DE LA RAÍZ DEL ÁLABE Y LA GUÍA DEL SOPORTE A TRAVÉS DEL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO**

Una vez realizadas las pruebas y exámenes físicos se procedió a una simulación por medio de un software, como resultado conoceremos el esfuerzo máximo alcanzado durante el funcionamiento de la turbina, aplicando la fuerza centrífuga a uno de los álabes

1. Cálculo de la fuerza generada por la acción centrífuga a un álabe.

$$F = mrw^2 \quad (1)$$

Datos conocidos de la turbina:

Velocidad = 5200 rpm

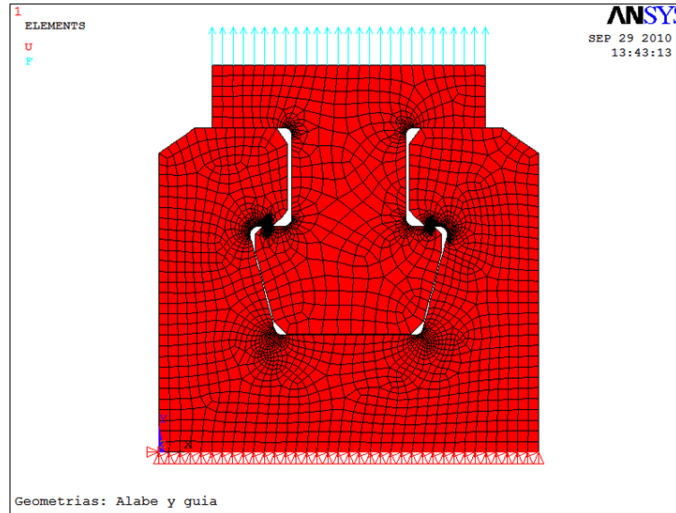
Masa = 148.17 gr

Radio = 33.9725 cm

Sustituyendo valores en la ecuación (1), obtenemos.

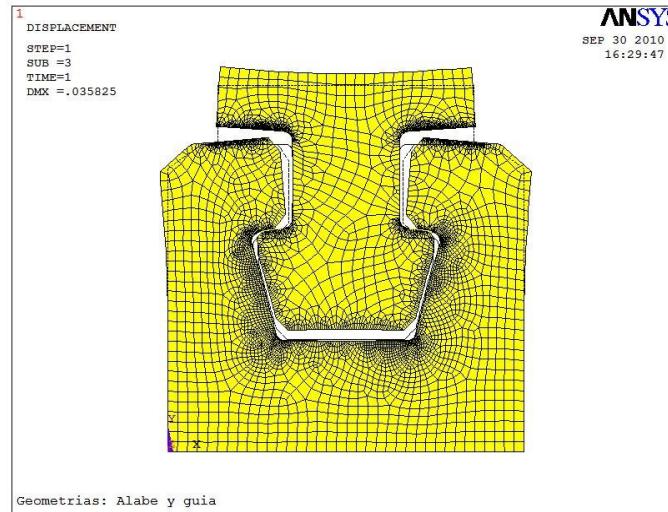
$$F = (0.14817)(0.339 \text{ m})(544.54)^2 = 14,926.284 \text{ N} = 3,355.56 \text{ lb}$$

2. La fuerza la aplicamos al seleccionar la línea superior del área de la raíz, tal como se muestra en la siguiente figura:



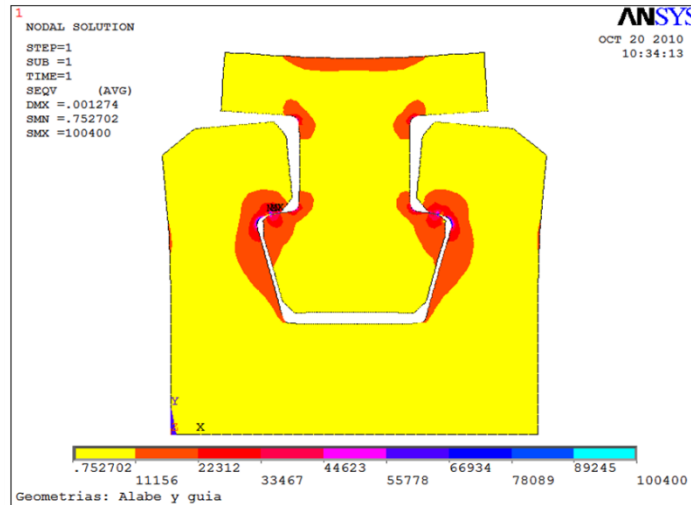
**Figura 57 Distribución de la fuerza en los elementos**

- 3.
4. La deformación de la pieza es la siguiente:



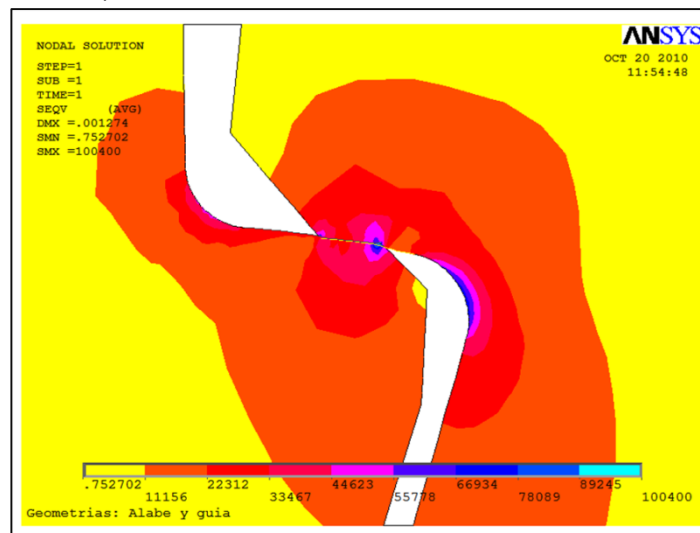
**Figura 58 Reacción de la pieza a la fuerza aplicada**

5. Al hacer la simulación usando el contacto entre superficies se tienen los siguientes esfuerzos de Von Mises:



**Figura 59 Distribución de esfuerzos**

6. Haciendo un acercamiento a la parte donde se desprendió la pieza metálica del alojamiento del álabes, tenemos:



**Figura 60 Distribución de esfuerzos en la zona crítica**

El valor máximo del esfuerzo obtenido es de 692.2336 MPa (100,400 psi).



## 8 RESULTADOS

Como anteriormente fue señalado, el objetivo de este análisis de falla es el determinar el mecanismo de origen y crecimiento de las grietas que dio origen a la fractura total del disco 5 e inicio de la fractura del disco 4 de la turbina de vapor.

Los resultados de la inspección visual en ambos discos indican que la fractura tuvo origen en el barreno del disco de la turbina. Además, en el disco 5, una de las superficies de fractura está cubierta por una capa de productos de corrosión, lo cual indica que esta fue la fractura inicial y que la otra fue una fractura secundaria debido al rompimiento de la primera pestaña del canal guía del disco.

Por otro lado, la inspección visual en el disco 5 revela evidencia de metal completamente deformado, así como huellas de deformación plástica en los álabes remanentes en el disco, esto indica que hubo desprendimiento de material y que por golpes pudo provocar esos daños tanto en los álabes, en los tetones, como en el material deformado. No obstante estos efectos fueron posteriores al agrietamiento principal por lo que estos hechos no son discutidos a más profundidad.

Siguiendo con los resultados de la inspección visual en el disco 5, aquí debemos comentar el hecho de encontrar deformación en el fondo del barreno demuestra que el seguro que estaba allí localizado debió golpear hacia abajo antes de salir desprendido con el agrietamiento. Evidencia de esta deformación plástica también fue encontrada en la superficie de fractura al borde del barreno; indicando esto, que también el seguro dañó estos bordes.

También, dentro de la inspección visual del disco 5, se encontraron inicios de grietas en la parte interna de la ranura para los álabes. En esta zona de cambio de sección donde ajustan los álabes se genera un concentrador de esfuerzos lo cual puede ser una zona crítica para la generación de microgrietas y futuras fallas.

Los resultados de la inspección visual en el disco 4 indican que la fractura tuvo origen en el barreno del disco de turbina. Además, el hecho de encontrar una grieta secundaria con origen en el mismo barreno pero en dirección a la superficie de la canaleta conforma la aseveración anterior.

Por otro lado, la inspección visual del disco 4 revela evidencia de metal completamente deformado, así como huellas de deformación plástica en los álabes remanentes en el disco, además de levantamiento de los tetones. No obstante la importancia de la evidencia, estos defectos fueron posteriores al agrietamiento principal o incluso pudieron ser originados durante el corte de este disco de turbina por lo que estos hechos no son discutidos a mayor profundidad.



Otro hecho relevante encontrado por medio de inspección visual en el disco 4 fue que la grieta crecía con un patrón tipo frágil, y siguiendo siempre el radio de la canaleta, además de lo anterior mediante un corte mecánico transversal fue detectado que la grieta tenía origen en el radio de la canaleta por lo que uniendo ambas evidencias se puede afirmar que el radio de la canaleta actuó como concentrador de esfuerzos.

Además de lo anterior la inspección visual del disco 4 encontró evidencia de deformación plástica en el barreno sin fractura en la contraparte de la canaleta fracturada; este hecho indica que en ese lugar hubo un esfuerzo alto en dirección perpendicular a la deformación y que el barreno sufrió una carga considerable en esta parte.

Respecto a la composición química del disco 5 los resultados demuestran que la composición química medida corresponde con la composición química nominal de un acero AISI 4340, pero debe resaltarse el hecho que el contenido de Silicio se encuentra ligeramente arriba del límite superior (0.32%) al igual que el contenido de Níquel (2.02%); no obstante las diferencias son despreciables y podemos decir que el material está de acuerdo con la norma.

Sin embargo debe resaltarse el hecho de encontrar 0.15 % de Cobre en la composición química. El Cobre es un elemento, cuyo contenido no está normalizado pero es de tomarse en cuenta. En la literatura ha sido documentado que el contenido de este elemento está relacionado con el contenido de chatarra utilizado durante la fusión y este elemento en el acero puede llevar a fragilización en caliente ("Hot shortness"), pérdida de ductilidad por precipitación de cobre en los límites de grano, y algún otro tipo de problema. En este caso el contenido de Cobre (Cu) es de 0.15% y este debe de tomarse en cuenta para el proceso y las aplicaciones. Ya que la evidencia del análisis EDX en la superficie de fractura indica la presencia de Cobre entre los granos austeníticos. Esta evidencia es discutida más adelante.

En lo que respecta a la composición química del disco 4 encontrada por el análisis químico cuantitativo llevado a cabo; debe comentarse que no se tiene información oficial del material pero se supuso un acero AISI 4340 y la composición química encontrada mediante espectrometría de emisión óptica indica una composición que corresponde a la de un acero AISI 8615, por lo que el acero del disco 4 de la turbina NO coincide con el disco 5. Este es un hecho muy importante ya que existe una gran diferencia en cuanto al contenido de Carbono entre el 4340 y el 8615 (además de existir diferencia en el contenido de otros elementos aleantes), y esta diferencia lleva a un comportamiento del material diferente durante el tratamiento que a su vez produce propiedades mecánicas muy diferentes (menores). Lo anterior puede comprobarse observando los resultados de las pruebas mecánicas.

Un hecho muy importante revelado por el análisis químico cuantitativo del disco 4 es encontrar 0.02 % de Cobre en la composición química. Este contenido de Cobre es muy bajo y no pudo jugar un papel en el mecanismo de fractura de este componente.



Respecto al análisis metalográfico del disco 5 llevado a cabo en el material de la muestra, revela la existencia de una microestructura de martensita revenida, regiones de austenita retenida, un alto nivel de inclusiones no metálicas y carburos precipitados.

Debe resaltarse el hecho de encontrar un alto nivel de inclusiones no metálicas en el material del disco 5 de la turbina, ya que este tipo de componentes deben ser manufacturados de materiales de alta pureza. De acuerdo al estándar ASTM E-45 el valor nominal en los aceros es de 1 a 1.5 de la serie gruesa, y el valor encontrado en este metal oscila de 5 a 5.5, aunque las inclusiones eran de tamaños pequeños fue encontrada evidencia de inclusiones alineadas y en otros casos formando cúmulos (clusters).

Las inclusiones no metálicas son inherentes en todos los aceros y difíciles de eliminar, por lo que en condiciones normales no se considera un factor crítico en el desarrollo de fallas, sin embargo se debe tener en cuenta que cuando las inclusiones no metálicas se encuentran en un alto nivel y el material es sometido a cargas elevadas, éstas actúan como concentradores de esfuerzo. Llevando al agrietamiento del componente.

Debe comentarse en el disco 5 que el nivel de inclusiones no metálicas de tipo MnS (Sulfuro de manganeso) es bajo porque como lo indican los resultados de espectrometría de emisión óptica. El nivel de Manganeso (Mn) es elevado pero el nivel de Azufre es muy bajo (S). Sin embargo, no todas las inclusiones no metálicas son de tipo MnS ya que fueron detectadas inclusiones de tipos de óxidos. Estas inclusiones fueron analizadas por medio de microanálisis EDS y los resultados son comentados más adelante. Estos hechos son importantes ya que la presencia de partículas en grietas secundarias indican que estas jugaron un papel importante en el crecimiento de la grieta que llevó a la fractura del disco de la turbina.

Otro hecho importante en el disco 5 revelado por el análisis metalográfico es la evidencia de huecos rodeando algunas inclusiones no metálicas, este hecho indica que durante la deformación en caliente de este material existió la formación de estos huecos y estos son sitio de propagación de grietas muy favorables. Esto puede deberse a que la velocidad de deformación durante la forja pudo haber sido alta. Sin importar el origen de estos huecos, estos actúan como grietas que crecen con menor energía.

Otro hallazgo relevante en el disco 5 encontrado en la microestructura fue que existían grietas secundarias con origen en la superficie y unas otras que no tenían origen en la superficie de fractura sino que se ubicaban por debajo de ésta. Este hecho es importante porque en estas grietas secundarias se puede observar que tienen inclusiones no metálicas dentro de ellas o en algunos casos carburos precipitados. A este respecto debe mencionarse que también fue detectada la presencia de carburos precipitados en forma de cadenas y esto es dañino para las propiedades mecánicas ya que al formar cadenas de carburos estos son caminos por donde las grietas crecen de manera muy favorable.

Respecto al análisis metalográfico del disco 4 llevado a cabo en el material del disco de turbina, este demostró la existencia de una microestructura de bainita, austenita retenida,



inclusiones no metálicas y carburos precipitados formando redes en los límites de grano austenítico. Esta microestructura corresponde a la de un acero de escaso contenido de Carbono (el análisis químico reveló solo 0.16 %) que fue sometido a un proceso de temple y revenido. El hecho de encontrar cadenas de carburos precipitados en límites de grano austenítico es un indicativo de que este material fue sometido ya sea a una temperatura de austenizado muy alta o a un tiempo prolongado a alta temperatura. En este caso, se supuso que el austenizado se llevo a cabo a 840° por 4 horas y luego templado y revenido a 650° por 6 horas. Debe de comentarse que los carburos requieren mínimo de 1000° (esta temperatura es variable ya que depende del tipo de carburos) para poder ser disueltos en la matriz del acero, pero si ya se encuentran precipitados en la matriz del acero al ser calentado, estos tienden a crecer.

El problema de la precipitación de carburos en los límites de grano austenítico es que estos tienden a fragilizar la microestructura, al contrario de cuando los carburos son precipitados en el interior de la agujas de bainita, martensita o en los granos de ferrita. En la literatura ha sido reportado que los carburos precipitados en los límites de grano austenítico llevan a falla por generación de micro y macrogrietas en los puntos triples y al largo de los límites de grano que llevan al desmoronamiento del acero durante la deformación o el uso.

Por otro lado, respecto al nivel de las inclusiones no metálicas en el disco 4, se debe comentar que estas son inherentes en todos los aceros y difíciles de eliminar por lo que en condiciones normales no se considera un factor crítico en el desarrollo de fallas; no obstante, debe de tenerse en cuenta que cuando las inclusiones no metálicas se encuentran en un alto nivel y el material es sometido a cargas elevadas estas actúan como concentradores de esfuerzo, llevando al agrietamiento del componente (este hecho puede verse en la fractografía de la probeta de ensayo tensil).

Debe comentarse en el disco 4 que el nivel de inclusiones no metálicas de tipo MnS es bajo porque como lo indican los resultados de espectrometría de emisión óptica el nivel de Manganeseo (Mn) es elevado (de hecho está fuera de especificación) pero el nivel de Azufre es muy bajo (S). Sin embargo, no todas las inclusiones no metálicas son de tipo MnS ya que fueron detectadas inclusiones de tipos de óxidos o nitruros.

Otro hallazgo relevante en el disco 4 encontrado en la microestructura fue que existía una grieta secundaria con origen en el radio de la canaleta. Esta grieta tiene un patrón de tipo frágil siguiendo los límites de grano austenítico. Por otro lado, el análisis metalográfico en la superficie transversal a la grieta indica que existe descohesión entre los granos austeníticos; por otra parte el hecho que los huecos se localicen en los límites de grano austenítico confirman la aseveración hecha anteriormente.

Siguiendo con el análisis metalográfico en el disco 4 realizado en la superficie transversal al disco debe comentarse que es muy importante el hecho que la fractura tenga como origen el radio de la canaleta; ya que este radio actúa como concentrador de esfuerzos y



esto lleva a que el campo de esfuerzos sea distinto al campo de esfuerzos en otras zonas del disco. Este hecho y la consecuencia se discuten más adelante.

Los resultados del análisis fractográfico en el disco 5 demuestran que la fractura inició en el barreno y que presentaba un patrón de grieta intergranular.

Aunque pareciera contradictorio con el resultado de encontrar deformación plástica en el fondo del barreno del disco 5, debe tenerse en cuenta que de acuerdo a lo encontrado por los ensayos mecánicos a la tensión este material aun conserva alrededor de un 6 % de ductilidad (tomando en cuenta que el alargamiento es un medida cualitativa de la ductilidad). Por lo tanto podemos entender de estas evidencias que la fragilización fue parcial.

Los resultados del análisis fractográfico en el disco 4 demuestran que la fractura inició en el barreno del disco porque existe evidencia de grietas secundarias paralelas a la grieta principal y que también tienen origen en la superficie del barreno.

Por otro lado el análisis fractográfico en el disco 4 también reveló que en el origen de la grieta el patrón de fractura era de cuasiclivaje; esto por encontrarse evidencia de hoyuelos de fractura (dimples) y evidencia de clivaje (predominantemente cercano a las inclusiones no metálicas) pero después el patrón de crecimiento de la grieta es intergranular.

Aunque pareciera contradictorio con el resultado de encontrar al inicio un patrón de cuasiclivaje y luego un patrón intergranular esto se puede explicar por el hecho de que la grieta al crecer siguió el borde interno de la canaleta teniendo como origen el radio interno de esta. En la literatura se puede encontrar que el estado de esfuerzos afecta la habilidad de un material para deformarse plásticamente sobre todo en materiales Cúbicos Centrados en el Cuerpo (como es el caso de los aceros). Ha sido demostrado que estos metales están afectados por la microestructura, nivel de resistencia, y de la intensidad de esfuerzos triaxiales, tales como los que están presentes en muescas y que estos pueden llevar de un patrón de fractura de hoyuelos por fractura a un patrón intergranular. En este caso el radio tan pequeño actúa como muesca dando lugar a una superficie de fractura intergranular en la fractura principal.

Los resultados en el disco 5 del microanálisis EDX en una de las inclusiones analizada por medio de microanálisis EDX indican elementos tales como: Silicio (Si), Calcio (Ca) y Aluminio (Al) y Oxígeno (O), esto indica que estas inclusiones no metálicas pudieron ser arrastradas desde el proceso de siderurgia secundaria.

Por otro lado en la superficie de fractura del disco 5 fueron llevados a cabo algunos microanálisis EDX encontrando elementos como Hierro (Fe), Oxígeno (O), Cobre (Cu), Azufre (S), Manganeseo (Mn), Silicio (Si). El hecho de encontrar evidencia de cobre en la superficie de fractura fragilizada refuerza la aseveración hecha sobre la precipitación de cobre en los límites de grano austeníticos. Además de lo anterior la inspección por medio de microscopía electrónica de barrido (MEB) también fue llevada a cabo en la superficie del





análisis metalográfico y fue realizado un microanálisis EDX en una de las grietas secundarias donde se encontró la existencia de Cobre (Cu), de Aluminio y Oxígeno (O). Con lo que se comprueba la importancia de las inclusiones no metálicas y la precipitación de Cobre en el proceso de agrietamiento del componente. Los resultados de esta medición coinciden con las evidencias encontradas por el análisis químico y metalografía; y con ello refuerzan las aseveraciones hechas en este informe.

Los resultados en el disco 4 del microanálisis EDS en una de la superficie de fractura analizada indican elementos tales como: Hierro (Fe), Cromo (Cr), Silicio (Si), demostrando con ello que no existe Cobre en la superficie de fractura.

El análisis de los resultados de los ensayos mecánicos del disco 5 a la tensión llevados a cabo en 3 probetas tomadas del material del disco de turbina indican un alto esfuerzo máximo a la tensión y un alargamiento muy bajo (alrededor de 7 %) si comparamos estos resultados con lo reportado por el cliente podemos ver que las propiedades mecánicas (cedencia y esfuerzo máximo) son mayores al igual que la dureza, pero que el alargamiento es mucho menor. Este hecho puede estar relacionado con el hecho de encontrar carburos precipitados, los cuales pudieron precipitar durante el trabajo de este disco, ya que según lo informado esta turbina trabajó a una temperatura de 350 °C durante más de un año. Es bien conocido el fenómeno de envejecimiento por temperatura del acero (Ageing) en el cual al ser sometido a una temperatura de entre 355 y 455 K (aproximadamente) ocurre la precipitación de carburos de transición.

Por último, debe de comentarse que la fractografía llevada a cabo en una probeta para ensayo mecánico de tensión del disco 5; demuestra que existe una zona con patrón de fractura intergranular donde comenzó la fractura de la probeta y otra zona con hoyuelos de fractura (dimples), los cuales son un patrón de fractura dúctil, y la evidencia de inclusiones no metálicas. Esta evidencia confirma la aseveración de una falla de la turbina por la fragilización parcial por precipitación de cobre combinada con el alto nivel de inclusiones no metálicas.

El análisis de los resultados de los ensayos mecánicos del disco 4 a la tensión llevados a cabo en 3 probetas tomadas del material del disco de turbina indican un esfuerzo máximo a la tensión de 820 MPa (en promedio) y un alargamiento 17 % (en promedio) si comparamos estos resultados con lo reportado por el fabricante podemos ver que las propiedades mecánicas (cedencia y esfuerzo máximo) son menores al igual que la dureza. Este hecho está relacionado con el hecho de el material se trata de un acero AISI 8615 y no de un acero AISI 4340 (templado y revenido) como se supuso.

También debe de comentarse que la fractografía llevada a cabo en una probeta para ensayo mecánico de tensión del disco 4; demuestra que las inclusiones juegan un papel importante en la fractura de este acero pero también revela un patrón de tipo hoyuelos de fractura (dimples), el cual no coincide con el patrón de fractura de la muestra. Esta diferencia puede explicarse por que el estado de esfuerzos aplicado a la probeta de tensión es un estado de esfuerzos uniaxial, mientras que el estado de esfuerzos existente en la



muestra durante la fractura es triaxial por la existencia del radio de la canaleta que actuó como muesca. Aunado a lo anterior el hecho de encontrar carburos precipitados en los límites de granos facilitó una falla de tipo intergranular.

Este hecho se confirma con la presencia de un patrón de tipo cuasiclivaje en el origen de la grieta del disco 4, mientras que la grieta al crecer y seguir el radio de la canaleta entonces cambia a intergranular; demostrando con ello la importancia del radio en la fractura de este disco de turbina. Además de lo anterior puede verse que el clivaje es debido a la presencia de inclusiones no metálicas en esta punto de la grieta y los hoyuelos de fractura ocurren en la matriz del acero (debe de tenerse en cuenta que el cuasiclivaje es una mezcla de hoyuelos por fractura y clivaje), mientras que en la probeta también se observa clivaje en las cercanías a las inclusiones no metálicas.

Con respecto a la dureza del disco 5 tiene un promedio de aproximadamente de 36 HRC, lo cual es una dureza muy alta.

Por otro lado la dureza en el disco 4 tiene un promedio de aproximadamente de 28 HRC, lo cual se puede considerar como límite para este tipo componentes, pero siempre y cuando fuera acero AISI 4340.

Por último, la simulación realizada por el método de elemento finito dio un esfuerzo máximo en la zona de fractura de 692.2336 MPa. Al hacer la comparativa de los esfuerzos encontrados en la simulación y de los esfuerzos a la tensión obtenidos en las pruebas mecánicas realizadas en ambos discos, se observó que los esfuerzos que están alrededor del punto de contacto entre las superficies, son inferiores que los que soporta el material (AISI 4340 y AISI 8615). Por lo que el material soporta la fuerza generada por la acción centrífuga de la turbina, así que podemos descartar una "sobrecarga" como un factor de falla.



## 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el estudio de análisis de falla llevado a cabo en dos discos de la turbina de vapor (no. 4 y no. 5) se encontró evidencia de un material de fabricación con un gran número de deficiencias, que van desde la forja hasta la selección del mismo.

Ambos discos estuvieron trabajando en el mismo ambiente y el hecho de que fallaran por mecanismos diferentes indica que las condiciones de trabajo (humedad, pH, composición química del vapor de agua, etc.) no influyeron en la falla. La superficie de fractura de la probeta para ensayo mecánico a la tensión del material del disco 5 se fracturó de manera frágil, mientras que el material del disco 4 la falla ocurrió de forma dúctil. Este se debió al hecho que el material del disco 5 tenía una microestructura martensítica (dura) y la del disco 4 correspondía a una de tipo bainítica (más tenaz que la martensítica).

El radio de la canaleta es de gran importancia, ya que como se mencionó anteriormente este puede actuar como un concentrador de esfuerzos, como primera instancia se pensó que la falla se debía al diseño de dicho radio, ya que en ambos discos la falla siguió la misma ruta en la canaleta, sin embargo una vez hecho el análisis estructural se descartó dicha hipótesis. La falla no se debió a una sobrecarga ni a un mal diseño, ya que la simulación hecha a través del método de elemento finito se encontró que el máximo esfuerzo ubicado en la zona de falla era inferior al esfuerzo último resultante de las pruebas en el material de cada uno de los discos, con lo que se demostró que el material era capaz de soportar la carga aplicada.

Así que, la falla de la turbina se atribuye a la baja calidad del material utilizado para su construcción. Destacando los siguientes aspectos:

Disco 5.- el principal responsable de la falla fue el elevado contenido de inclusiones no metálicas, ya que estas se desempeñaron como iniciadoras de grietas, además que el alto contenido de cobre precipitado en los límites de grano fragilizó la microestructura del material.

Disco 4.- la presencia de carburos precipitados en la microestructura participó en la falla del disco, la cual también fue acompañada por la presencia de cuasiclivaje entre los granos de la misma.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente estudio, se recomienda lo siguiente:

- A) Utilizar acero con un bajo nivel de inclusiones no metálicas en la manufactura de este tipo de componentes.
- B) Utilizar acero AISI 4340 con un nivel bajo de Cobre presente en el acero y de dureza no mayor a 28 HRC.



- C) Evitar utilizar material que tenga un nivel de inclusiones alto.
- D) Inspeccionar metalográficamente los discos de turbina sobre todo por lo que respecta al nivel de inclusiones.
- E) Adaptar el proceso de forja para evitar formar microgrietas que sirvan posteriormente como inicio de fracturas.
- F) Fabricar todos los discos y sus respectivos álabes para evitar futuros daños por causa del material defectuoso de fabricación de los discos porta álabes.



## 10 BIBLIOGRAFÍA

- P. Eng., Sanders P. William, 2001, Turbine steam Path, volume I Maintenance and Repair, PennWell, pp. 487-704.
- P. Eng., Sanders P. William, 2002, Turbine steam Path, volume II Maintenance and Repair, PennWell, pp.1-199
- Torregrosa S., Gurrutxaga I., Linaza A., Ostolaza K., "Determinación De La Curva De Propagación De Grietas Del In718 A Alta Temperatura Usando La Técnica A.C.P.D.", Bizkaia, España, pp. 1-6.
- Savov L., Volkova E., Janke D., 2003, "Copper And Thin In Steel Scrap Recycling", Materials And Geoenvironment, 50, (3), pp.1-15.
- Coutsouradai D., Leroy V., Greday T., Lecomte-Beckers J., 1983, Review Of Hot Shortness Problems In Copper Containing Steel.
- Lester E., 1985, Systematic Analysis Of Gear Failures, ASM, USA.
- ] Pritonsek V., Perus I., Kugler G., Turk R., Tercelj M., 2008, "Hot Forming Of AISI A2 Tool Steel", pp. 1-5.
- ASM International, 1992, ASM Handbook volume 12 Fractography.
- Dieter E. George, 1988, Mechanical Metallurgy, SI Metric Edition, Mc Graw Hill, PP. 348-470.
- Bloch P. Heinz, Geitner K. Fred, 1999, Machinery Failure Analysis and Troubleshooting, volume II and third edition, Gulf Publishing Company, pp. 1-250.



## **11 ANEXO 1**

### **11.1 INSPECCIÓN VISUAL DEL DISCO 5**



**Figura 61** Muestra del disco de la turbina en preparación para el laboratorio



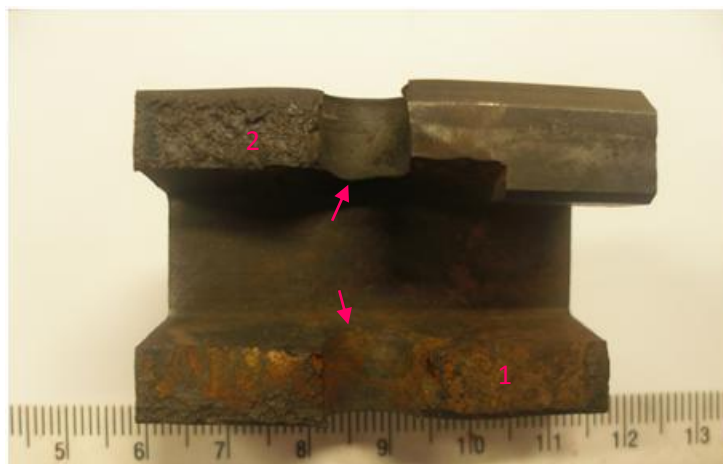
**Figura 62** Se observa que el origen de la grieta se encuentra en el barreno



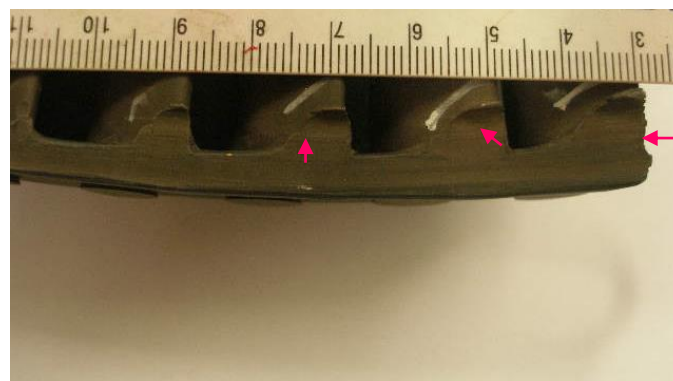
**Figura 63** Se muestra el fin de la fractura. Se observa desgarramiento de la pestaña de la guía de los álabes con el disco



**Figura 64 Superficie de la fractura primaria. Se observa una capa de productos de corrosión, el origen de la grieta en el barreno y deformación plástica en el fondo del mismo**



**Figura 65 Superficie de la fractura primaria y secundaria. Se observa que el origen de ambas es el barreno y la capa de productos de corrosión que cubre la superficie de fractura primaria**



**Figura 66 Cara de los álabes, se observa la existencia de deformación plástica por talladura**





## 12 ANEXO 2

### 12.1 ANÁLISIS QUÍMICO DEL DISCO 5



**Tabla 5 Análisis químico del disco 5**

<b>ANÁLISIS QUÍMICO</b>			
(valores expresados en % en peso)			
Elemento	ESPECIFICACION AISI	Resultado de Laboratorio	Observación
	4340		
Carbono	0.38-0.43%	0.43%	OK
Silicio	0.15-0.30%	0.32%	Fuera especificación
Fósforo	0.040% Max.	0.010%	OK
Manganeso	0.60-0.80%	0.67%	OK
Azufre	0.040% Max.	0.008%	OK
Cromo	0.70 – 0.90%	0.80%	OK
Molibdeno	0.20 – 0.30%	0.23%	OK
Níquel	1.65-2.0%	2.02%	Fuera especificación
Cobre	NA	0.15%	NA
Titanio	NA	0.001%	NA
Vanadio	NA	0.04%	NA



## **13 ANEXO 3**

### **13.1 INSPECCIÓN METALGRÁFICA DEL DISCO 5**



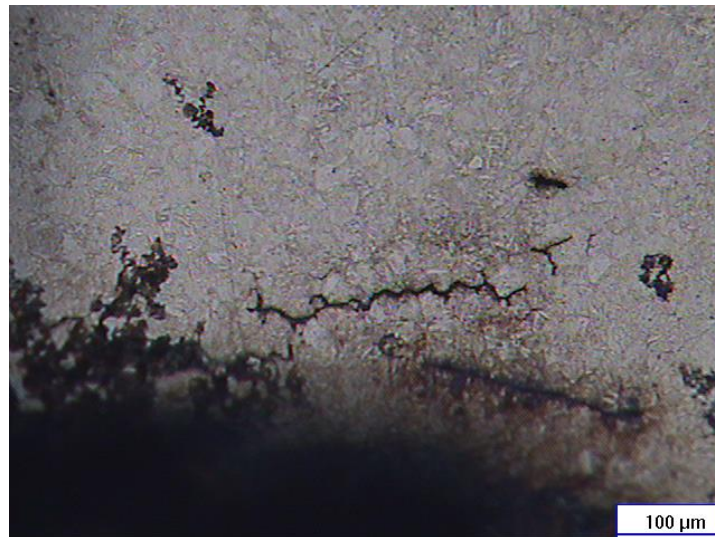
**Figura 67** Se muestra a una escala 100X la superficie para análisis metalográfico antes de ser atacada. Se observa un alto nivel de inclusiones no metálicas



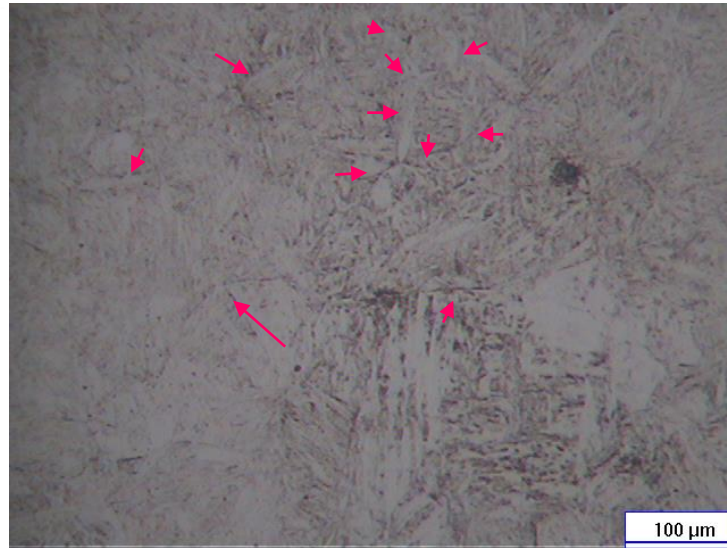
**Figura 68** Se muestra a una escala 500X la región de inclusiones no metálicas, donde se pueden ver huecos generados a partir de ellas



**Figura 69** La imagen muestra a 200X la superficie para análisis metalográfico en la superficie de fractura. Se observan grietas secundarias existentes dentro del material y otra que crece a partir de la fractura



**Figura 70** La micrografía muestra a 200X la microestructura cercana a la superficie de fractura. Se observa la existencia de fracturas secundarias y una microestructura de martensita revenida



**Figura 71** La micrografía muestra a 500X la microestructura del material del disco de la turbina. Se observan carburos precipitados formando cadena en el límite de grano austenítico

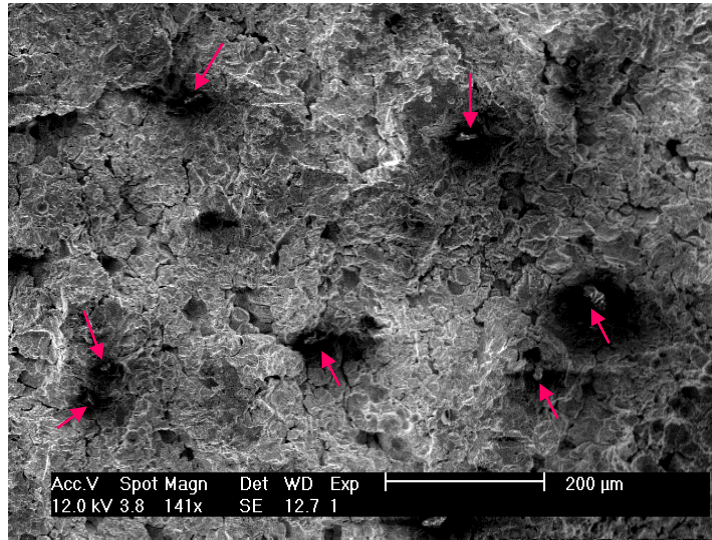


**Figura 72** La micrografía muestra a 500X la microestructura en una de las grietas secundarias. Se observa en una zona la presencia de una inclusión no metálica

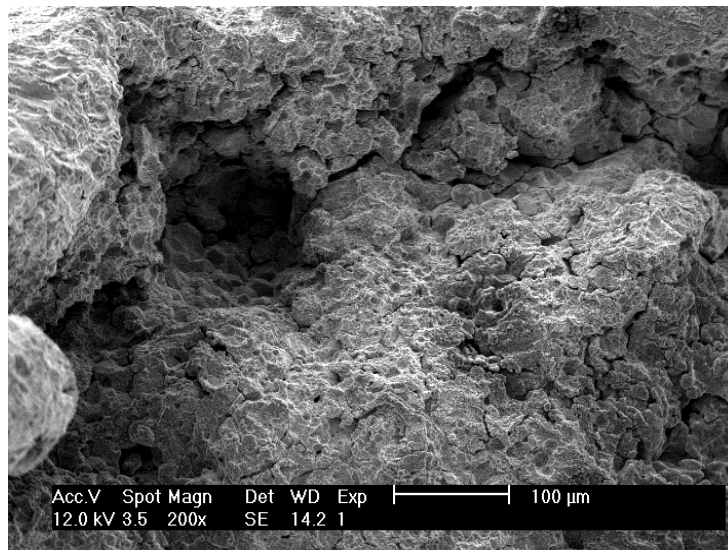


## **14 ANEXO 4**

### **14.1 INSPECCIÓN POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DEL DISCO 5**

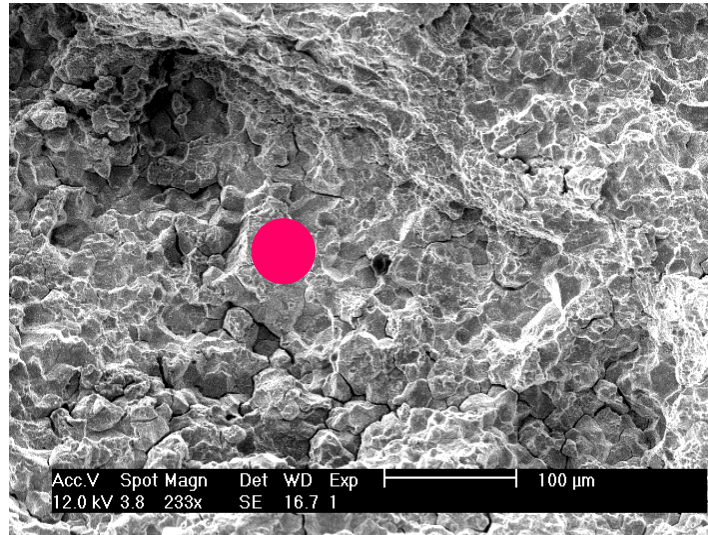


**Figura 73** La imagen MEB muestra la superficie de fractura en el borde del barreno. Se puede observar la existencia de inclusiones no metálicas y de grietas

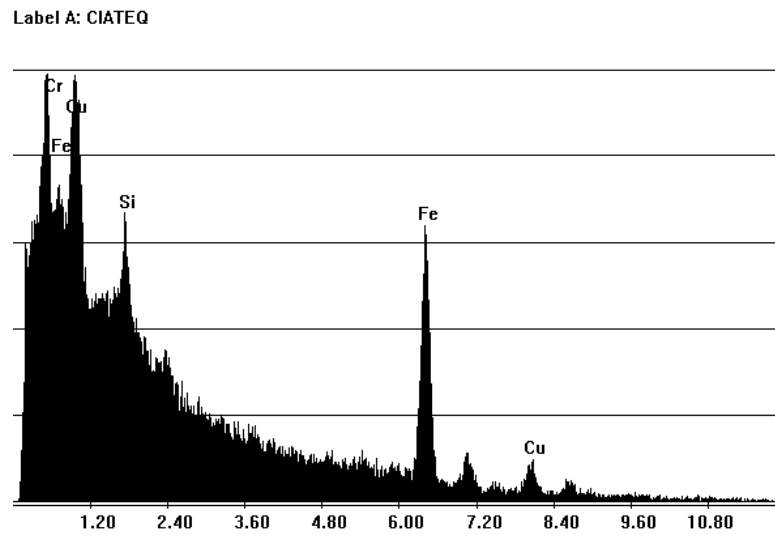


**Figura 74** La imagen MEB muestra la superficie de fractura en el borde del barreno. Se puede observar un patrón de fractura intergranular

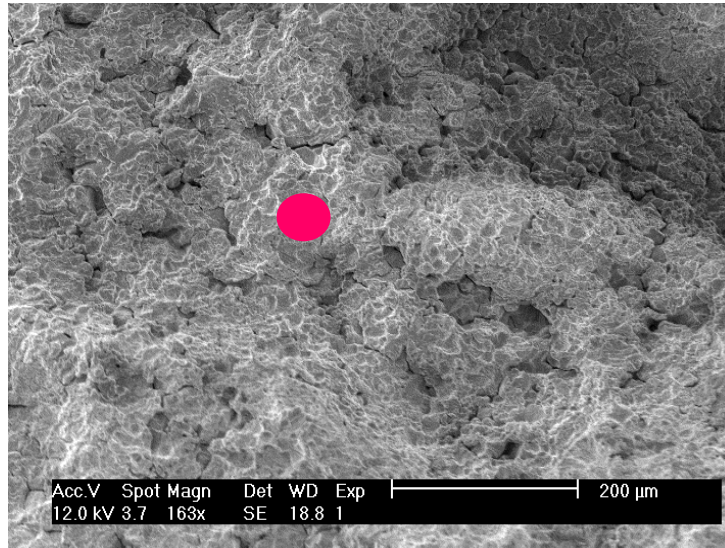




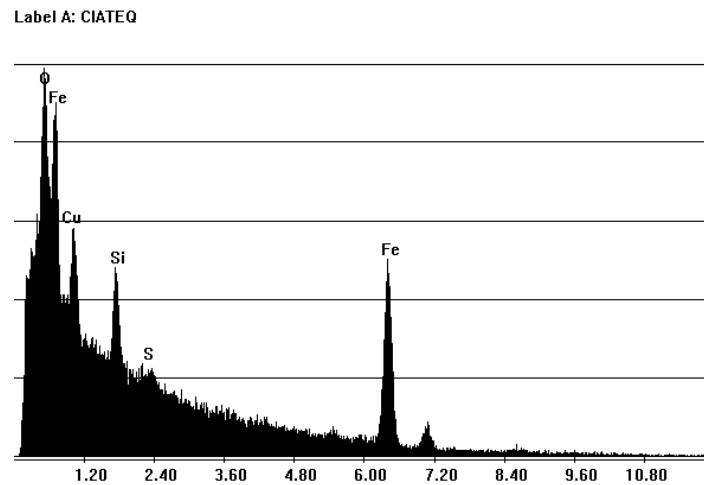
**Figura 75** La imagen MEB muestra la superficie de fractura en el borde del barreno. Se puede observar un patrón de fractura intergranular y el lugar donde fue llevado a cabo el análisis EDX 1



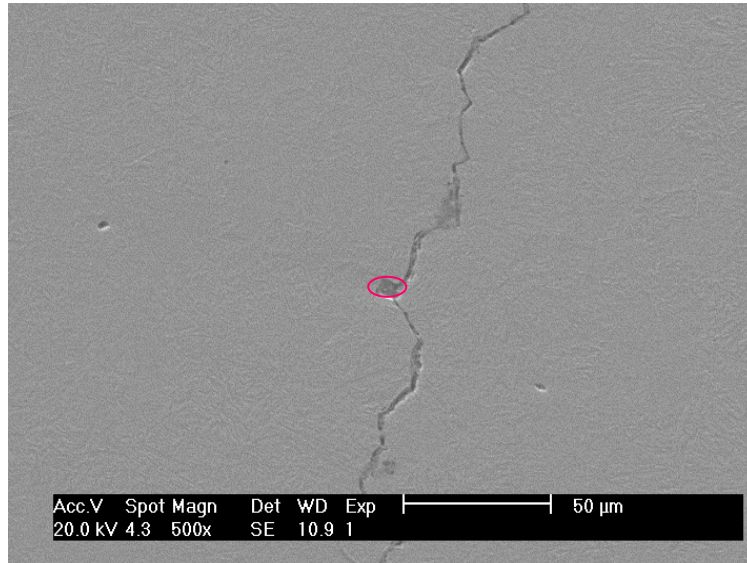
**Figura 76** La imagen muestra el resultado del microanálisis EDX 1



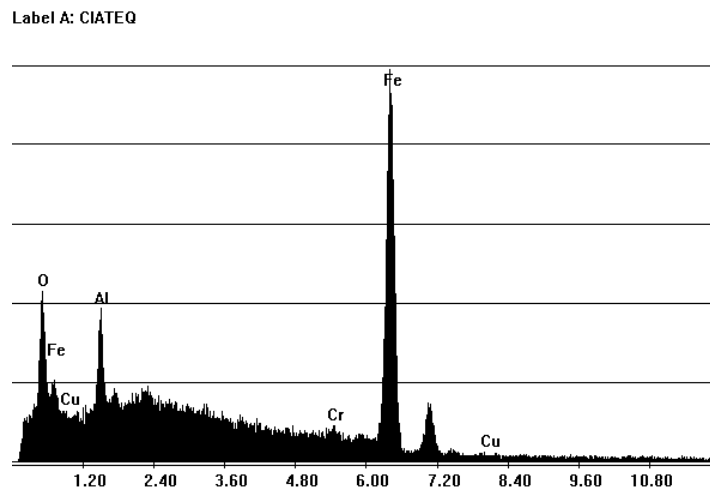
**Figura 77** La imagen MEB muestra la superficie de fractura en el borde del barreno. Se puede observar un patrón de fractura intergranular y el lugar donde fue llevado a cabo el análisis EDX 2



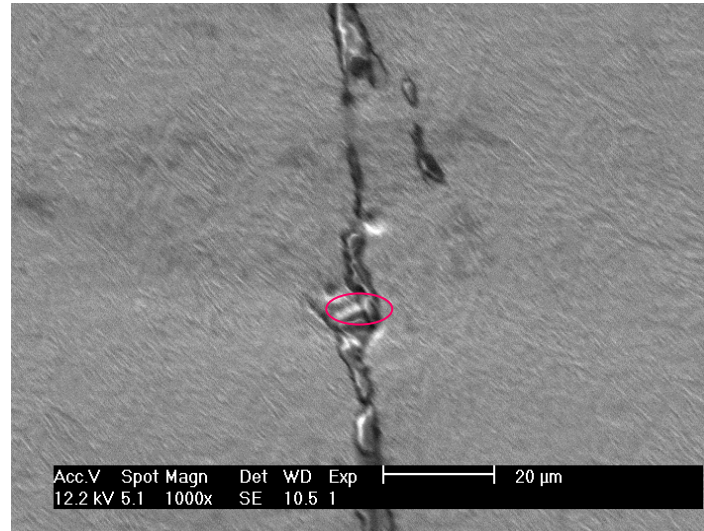
**Figura 78** La imagen muestra el resultado del microanálisis EDX 2



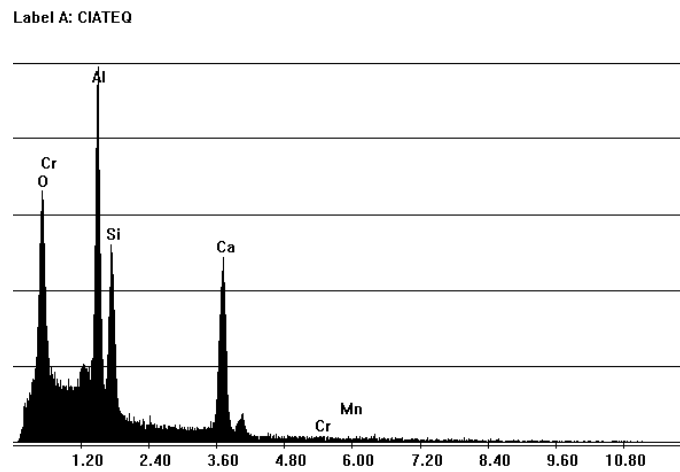
**Figura 79** La imagen MEB muestra una de las grietas secundarias, se puede observar la existencia de una inclusión no metálica y el lugar donde fue hecho el microanálisis EDX 3



**Figura 80** La imagen muestra el resultado del microanálisis EDX 3



**Figura 81** La imagen muestra una inclusión no metálica encontrada dentro de una de las grietas. Se observa el lugar donde fue realizado el microanálisis EDX 4

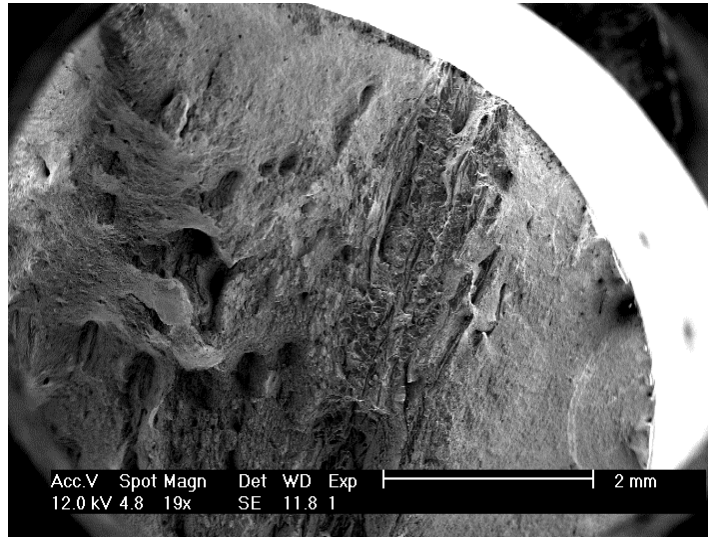


**Figura 82** La imagen muestra el resultado del microanálisis EDX 4

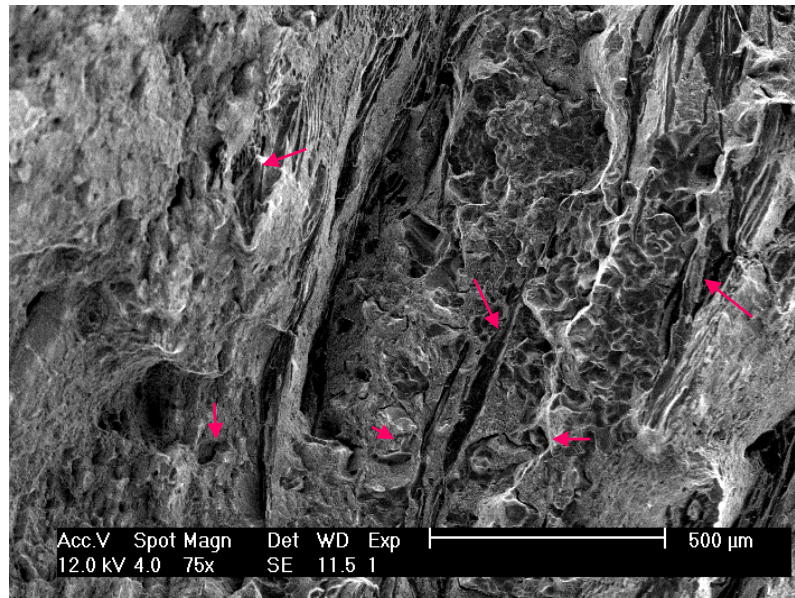


## **15 ANEXO 5**

### **15.1 MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL DISCO 5**



**Figura 83** La imagen MEB muestra la superficie de fractura de la probeta para ensayo mecánico de tensión. Se observa una zona fractura frágil y otra de fractura dúctil



**Figura 84** La imagen muestra la superficie de la fractura en la zona fragilizada. Se observa un patrón de fractura intergranular e inclusiones no metálicas

**Tabla 6 Propiedades mecánicas del disco 5**

<b>RESULTADOS DE PRUEBAS MECÁNICAS</b>					
CARACTERÍSTICAS		PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	
LONGITUD INICIAL	mm (in)	45,00 (1,77)	45,00 (1,77)	45,00 (1,77)	
LONGITUD FINAL	mm (in)	47,42 (1,87)	47,94 (1,89)	48,70 (1,92)	
DIÁMETRO INICIAL	mm (in)	8,90 (0,35)	8,82 (0,35)	8,93 (0,35)	
DIÁMETRO CINTURA	mm (in)	8,56 (0,34)	8,60 (0,34)	8,68 (0,34)	
ÁREA INICIAL	mm <sup>2</sup> (in)	62,18 (0,10)	61,07 (0,09)	62,60 (0,10)	
ÁREA CINTURA	mm <sup>2</sup> (in)	57,52 (0,09)	58,06 (0,09)	59,14 (0,09)	
CARGA MÁXIMA	KN (Ksi)	68,350 (15,364)	68,560 (15,412)	70,630 (15,877)	
CARGA CEDENCIA	KN (Ksi)	63,784 (14,338)	62,818 (14,121)	64,966 (14,604)	
RESISTENCIA A LA TENSIÓN	MPa (KSI)	1099,23 (159,377)	1122,70 (162,780)	1128,28 (163,589)	
ESFUERZO DE CEDENCIA	MPa (KSI)	1025,80 (148,730)	1028,67 (149,147)	1037,80 (150,470)	
ALARGAMIENTO	% (%)	5% 5%	7% 7%	8% 8%	
REDUCCIÓN ÁREA	% (%)	7% 7%	5% 5%	6% 6%	
<b>VALORES MEDIOS, INCERTUDUMRE Y ESPECIFICACIÓN</b>					
RESISTENCIA A LA TENSIÓN	MPa (KSI)	1116,74	(161.969)	± 34,79	
ESFUERZO DE CEDENCIA	MPa (KSI)	1030,76	(149.449)	± 30,56	
ALARGAMIENTO	% (%)	7%	7%	± 1,98	



## **16 ANEXO 6**

### **16.1 INSPECCIÓN VISUAL DEL DISCO 4**





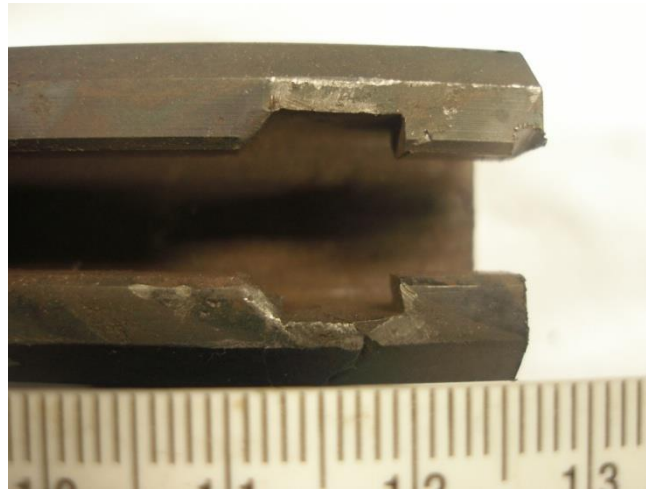
**Figura 85** Muestra del disco de la turbina en preparación para el laboratorio



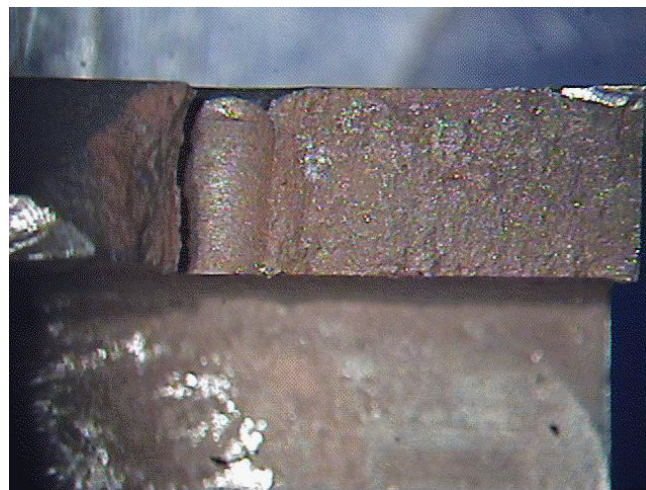
**Figura 86** Vista superior del disco



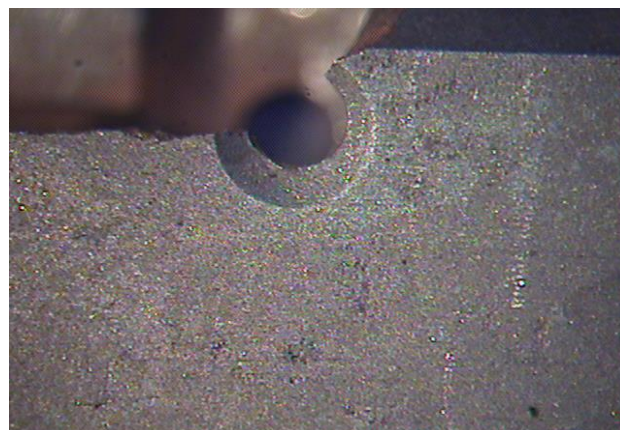
**Figura 87** Se observan dos fracturas con origen en el barreno, además de una deformación plástica en el mismo



**Figura 88** Se observa daño mecánico en la superficie de la canaleta



**Figura 89** Superficie de fractura del disco, se observa que el origen de la grieta se localiza en el barreno



**Figura 90** La imagen muestra a 10X el origen de las fracturas localizadas en el barreno



## **17 ANEXO 7**

### **17.1 ANÁLISIS QUÍMICO DEL DISCO 4**

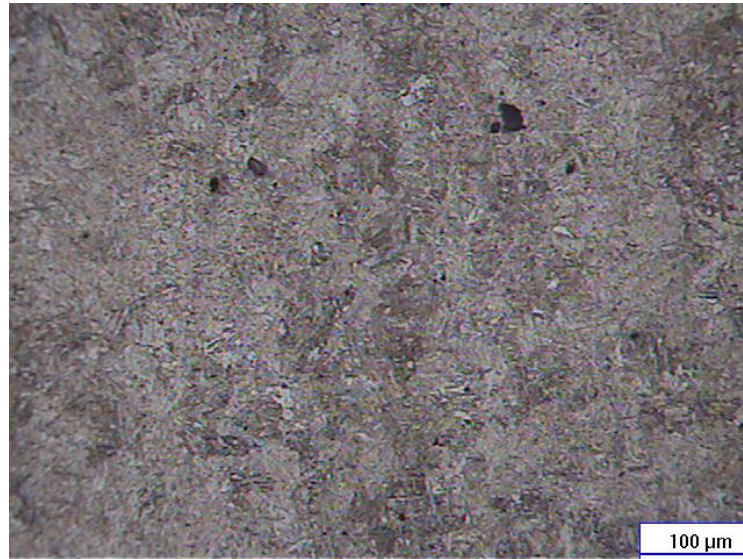
**Tabla 7 Análisis químico del disco 4**

<b>ANÁLISIS QUÍMICO</b>			
[Valores expresados en % en Peso]			
Elemento	ESPECIFICACION AISI	Resultado de Laboratorio	Observación
	8615		
Carbono	0.13-0.18%	0.16%	OK
Silicio	0.15-0.35%	0.29%	OK
Fósforo	0.035% Max.	0.011%	OK
Manganeso	0.70-0.90%	1.06%	Fuera especificación
Azufre	0.040% Max.	0.006%	OK
Cromo	0.40 – 0.60%	0.49%	OK
Molibdeno	0.15 – 0.25%	0.23%	OK
Níquel	0.40-0.70%	0.42%	OK
Cobre	NA	0.02%	NA
Titanio	NA	0.03%	NA
Vanadio	NA	0.05%	NA

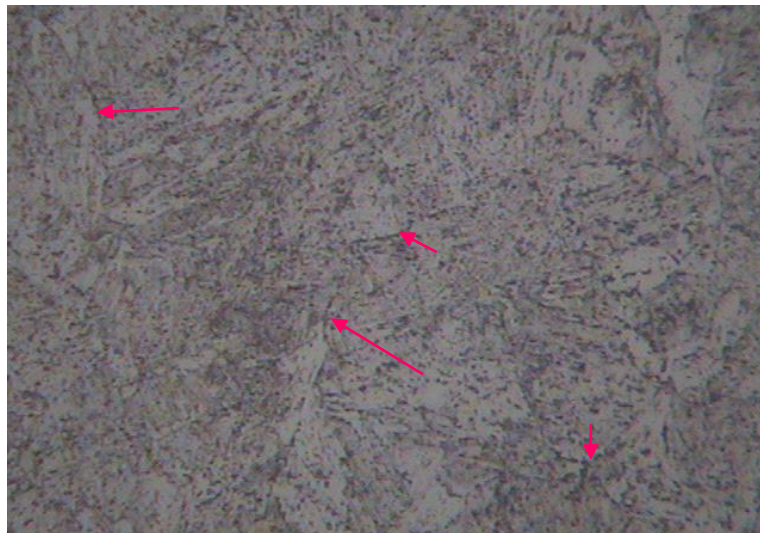


## **18 ANEXO 8**

### **18.1 INSPECCIÓN METALGRÁFICA DEL DISCO 4**



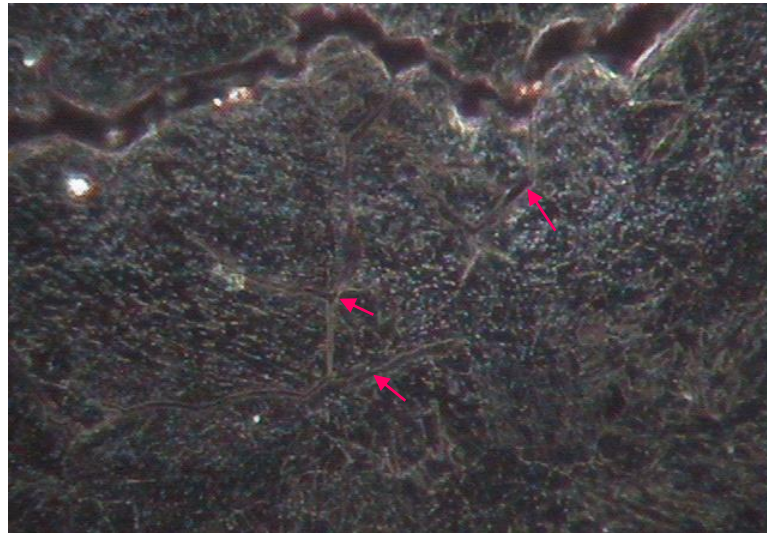
**Figura 91** La micrografía muestra a 200X la microestructura del material del disco, se observa la presencia de bainita, austenita retenida e inclusiones no metálicas



**Figura 92** La micrografía muestra a 1000X la microestructura del disco, además se pueden observar carburos precipitados en los límites de grano austenítico



**Figura 93** La micrografía muestra a 500X una grieta de tipo frágil en la cercanía de la grieta del radio de la canaleta



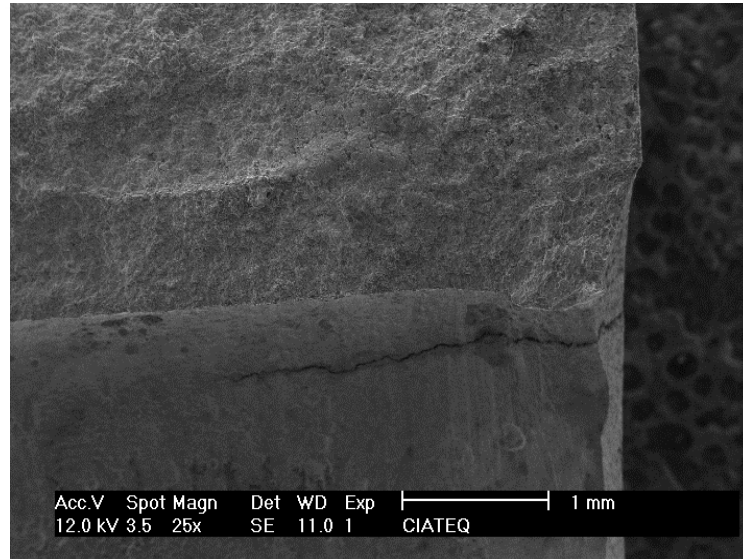
**Figura 94** La micrografía muestra a 1000X la microestructura del disco en la cercanía del radio de la canaleta, se observan carburos precipitados y decohesión entre los granos austeníticos



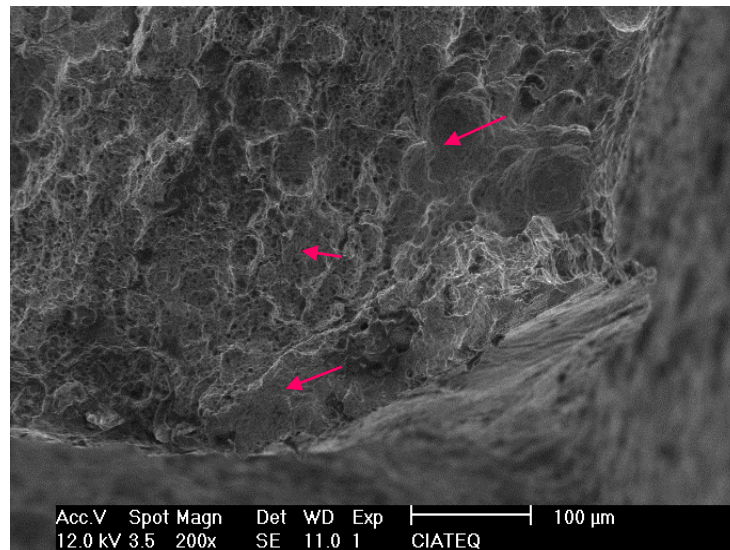
## **19 ANEXO 9**

### **19.1 INSPECCIÓN POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DEL DISCO 4**

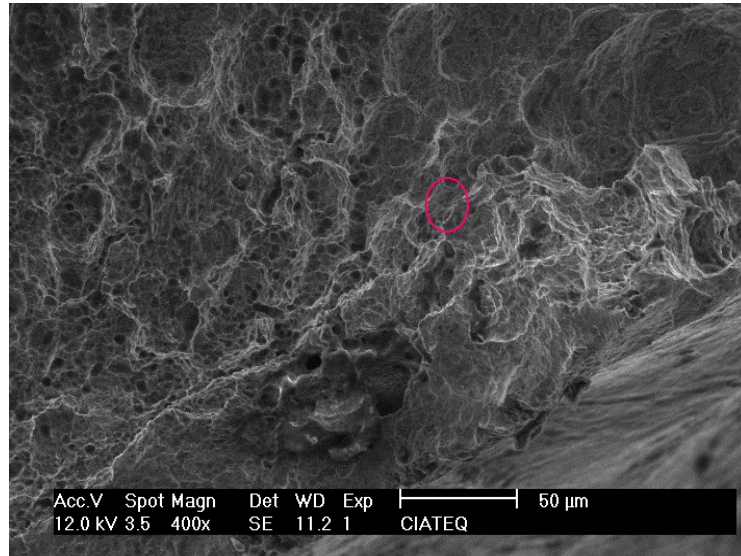




**Figura 95** La imagen MEB muestra el origen de la fractura en el barreno, se observa una grieta secundaria debajo de la superficie de fractura

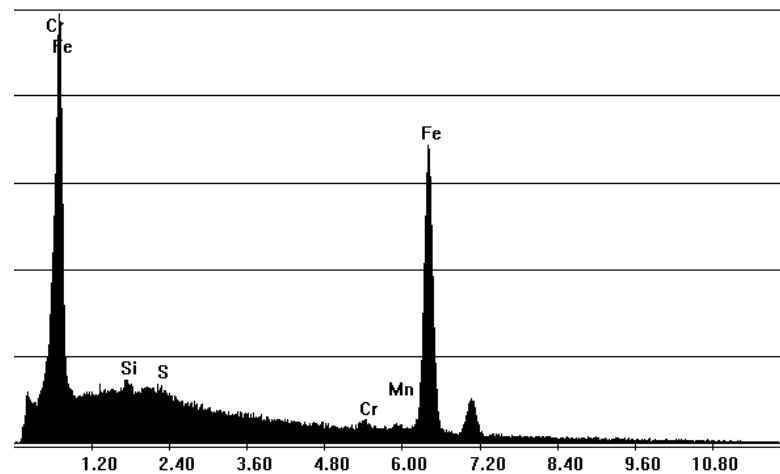


**Figura 96** La imagen MEB muestra el origen de la fractura en el barreno, se observa un patrón de tipo cuasiclivaje en el origen de la fractura y una inclusión no metálica

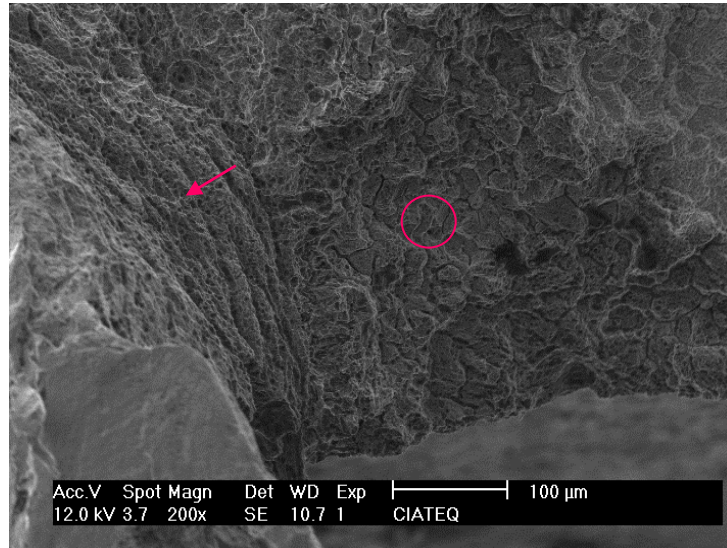


**Figura 97** La imagen MEB muestra el origen de la fractura en el barreno, se observa un patrón de tipo cuasiclivaje en el origen de la fractura y una inclusión no metálica, además del lugar donde se llevó a cabo el microanálisis EDS 1

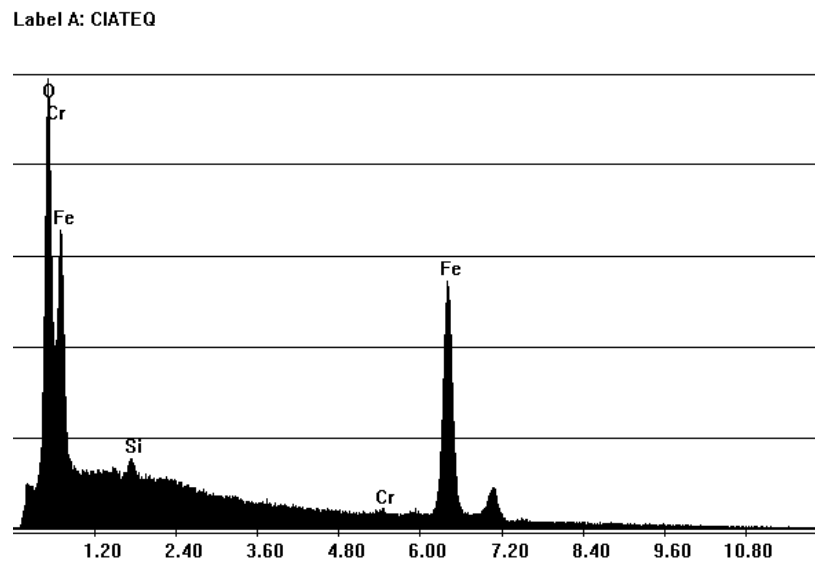
Label A: CIATEQ



**Figura 98** La imagen muestra el resultado del microanálisis EDS 1



**Figura 99** La imagen MEB muestra el lado contrario al origen de la fractura en el barreno. Se observa un patrón de tipo cuasiclivaje en el origen de la fractura y una zona con patrón intergranular, además del lugar donde fue realizado el microanálisis EDS 2

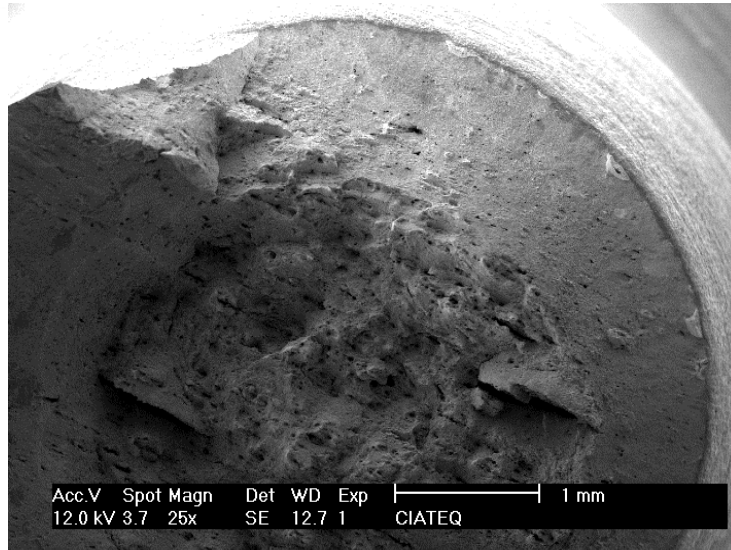


**Figura 100** La imagen muestra el resultado del microanálisis EDS 2

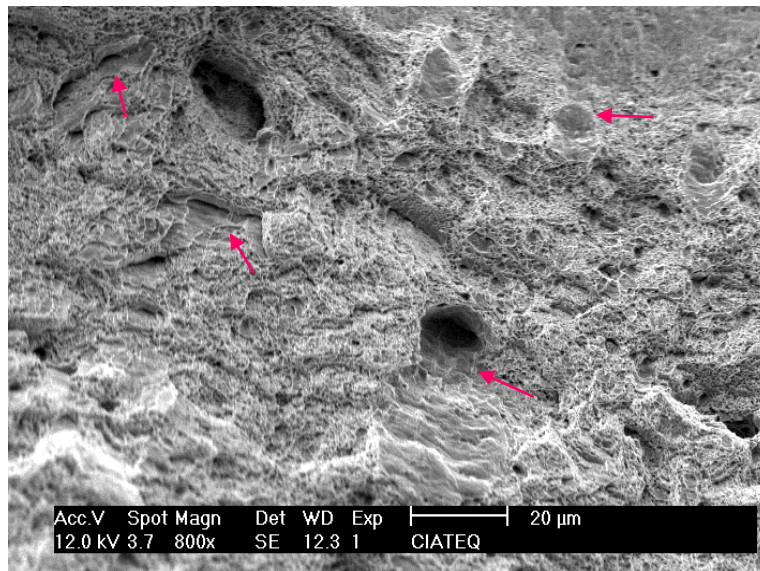


## **20 ANEXO 10**

### **20.1 MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL DISCO 4**



**Figura 101** La imagen MEB muestra la superficie de fractura de la probeta del ensayo a la tensión del disco



**Figura 102** La imagen MEB muestra la superficie de fractura. Se observan inclusiones no metálicas, patrón de hoyuelos de fractura, regiones de clivaje

**Tabla 8 Propiedades mecánicas del disco cuatro**

<b>RESULTADOS DE PRUEBAS MECÁNICAS</b>					
CARACTERÍSTICAS		PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	
LONGITUD INICIAL	mm (in)	45,00 (1,77)	45,00 (1,77)	45,00 (1,77)	
LONGITUD FINAL	mm (in)	52,88 (2,08)	52,89 (2,08)	52,31 (2,06)	
DIÁMETRO INICIAL	mm (in)	9,07 (0,36)	9,07 (0,36)	8,96 (0,35)	
DIÁMETRO CINTURA	mm (in)	5,42 (0,21)	5,48 (0,22)	5,42 (0,21)	
ÁREA INICIAL	mm <sup>2</sup> (in)	64,58 (0,10)	64,58 (0,10)	63,02 (0,10)	
ÁREA CINTURA	mm <sup>2</sup> (in)	23,06 (0,04)	23,57 (0,04)	23,06 (0,04)	
CARGA MÁXIMA	KN (Ksi)	52,910 (11,894)	53,310 (11,984)	51,810 (11,646)	
CARGA CEDENCIA	KN (Ksi)	48,560 (10,916)	48,990 (11,012)	47,730 (10,729)	
RESISTENCIA A LA TENSIÓN	MPa (KSI)	819,32 (118,793)	825,51 (119,691)	822,11 (119,197)	
ESFUERZO DE CEDENCIA	MPa (KSI)	751,96 (109,026)	758,62 (109,992)	757,37 (109,810)	
ALARGAMIENTO	% (%)	18% 18%	18% 18%	16% 16%	
REDUCCIÓN ÁREA	% (%)	64% 64%	63% 63%	63% 63%	
<b>VALORES MEDIOS, INCERTUDUMRE Y ESPECIFICACIÓN</b>					
RESISTENCIA A LA TENSIÓN	MPa (KSI)	822.31	(119.266)	± 25,83	
ESFUERZO DE CEDENCIA	MPa (KSI)	755.98	(109.609)	± 22,53	
ALARGAMIENTO	% (%)	17%	17%	± 1,02	