

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA AL AIRE
EN UN ACERO AISI 1020 CON DIFERENTES RADIOS
DE ACUERDO**

PRESENTADO POR:

**MANUEL EDUARDO ARÉVALO PALACIOS
JOSÉ ARMANDO OLMEDO GONZÁLEZ
ERICK EDUARDO VILLALOBOS CHÁVEZ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE DE 2020

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIA GENERAL :

M.Sc. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

Dr. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO :

Ing. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR :

Ing. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título :

**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA AL AIRE
EN UN ACERO AISI 1020 CON DIFERENTES RADIOS
DE ACUERDO**

Presentado por :

MANUEL EDUARDO ARÉVALO PALACIOS
JOSÉ ARMANDO OLMEDO GONZÁLEZ
ERICK EDUARDO VILLALOBOS CHÁVEZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, octubre de 2020

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

DEDICATORIA

A mis padres por estar siempre a mi lado apoyándome y regalándome todo su amor y cariño.

A mi demás familia, hermano, hermanas, primas y primos, tíos y tías y a mis abuelos a quienes les tengo un gran aprecio y cariño.

Manuel Eduardo Arévalo Palacios.

DEDICATORIA

A mis padres, Ana y José, por enseñarme con su carácter que todo el esfuerzo tiene su recompensa. Devolverles el apoyo que me han dado ha sido suficiente motivación para seguir adelante y dar más pasos en este largo camino.

A Fiorella, mi princesa, por enseñarme qué es la vida y demostrarme cuán lejos puede llegar el ser humano con sus ideales si se lo propone, a sobrepasar los límites sin olvidar los valores.

A la vida misma, por recordarme que no vivimos una sola vez, sino que vivimos todos los días.

José Armando Olmedo González.

DEDICATORIA

A mis padres, quienes han sido mi fuente de inspiración, y que con muchos sacrificios me han permitido llegar hasta acá. Gracias a mi madre por enseñarme que cualquier esfuerzo tiene su recompensa y a tener los pies sobre la tierra; porque nunca me faltó su amor, sus consejos y su comprensión, nunca podre recompensar todo lo que ha hecho por mí.

A mis tíos, Esther (Q.E.P.D), Miriam y Genaro, y por supuesto mi abuela María de Jesús, a quienes quiero incondicionalmente, porque sienten mis triunfos y mis fracasos como los suyos propios y por siempre tenerme en sus oraciones.

A mis queridos hermanos Rigo y Rossana, a mis primos Iris, Amanda, Diana, Víctor, Manolo, Alán y Gerson, en quienes siempre encuentro un respaldo que es recíproco, por esa unión que siempre nos ha caracterizado y que cualquiera que nos conozca lo puede afirmar.

A Mónica quien siempre ha creído en mí y por confiar que puedo llegar lejos si me lo propongo, porque ha tenido palabras de amor y de aliento en los buenos y los malos momentos y a su familia quienes me consideran parte de ellos.

“Por el sendero áspero, a las estrellas”

Erick Eduardo Villalobos Chávez.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por la vida, la salud y el conocimiento obtenido, el cual utilizamos para el bien de los que amamos y nos apoyan en cada etapa a la que nos enfrentamos.

A la Universidad de El Salvador, a la Facultad de Ingeniería y Arquitectura y a nuestros docentes, los profesionales que hacen posible la comprensión, el crecimiento y la formación integral, trabajando constantemente con esmero para brindar una parte de sus vidas a cada uno de los estudiantes que desean enriquecerse de las experiencias de tan respetables seres humanos.

A nuestros compañeros, nuestros amigos y a nuestras familias, por cada momento en los que nos apoyaron para seguir adelante a pesar de las dificultades encontradas.

Agradecemos profundamente al Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, nuestro asesor, quien con su preparación en la ciencia y la Ingeniería sumada a su extensa amabilidad y dedicación ha hecho posible que demos los pasos para alcanzar tan respetable logro.

Una barrera más que se supera, una meta más que se alcanza. Los obstáculos nos han fortalecido y nos llenan de felicidad cuando los culminamos con esfuerzo. Es momento de continuar por el sendero correcto del saber.

ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA AL AIRE EN UN ACERO AISI 1020 CON DIFERENTES RADIOS DE ACUERDO

Estudiantes: Brs. Manuel Eduardo Arévalo Palacios¹, José Armando Olmedo González² y Erick Eduardo Villalobos Chávez³
Docente Asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz⁴

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Universidad de El Salvador

RESUMEN

Se ha realizado una investigación sobre el comportamiento a la fatiga por flexión rotativa en probetas de acero AISI 1020 con 3 diferentes radios de acuerdo, los cuales corresponden a 8, 16 y 40 mm. A las probetas se les realizó un tratamiento térmico de recocido a 650 °C durante 30 min, con el fin de aliviar los esfuerzos residuales durante el maquinado. Se reportaron los resultados de 12 probetas para cada radio de acuerdo. Se aplicó la norma de la ASTM designación E 739 para el análisis de resultados de los ensayos con el propósito de justificar el número de probetas utilizadas para cada radio de acuerdo. Además, se utilizó el método de aproximación lineal de mínimos cuadrados para ajustar la mejor curva de resistencia a la fatiga para cada radio de acuerdo. Se obtuvo una menor resistencia a la fatiga para los radios de acuerdo de 8 mm comparados con los resultados obtenidos para las probetas con radio de acuerdo de 16 y 40 mm debido a que en la medida se incrementa el radio de las probetas se produce una menor concentración de esfuerzos, por lo que la resistencia a la fatiga es mayor. Finalmente, se realizó una determinación del costo por probeta ensayada.

Palabras claves: Resistencia a la fatiga, Vida a la fatiga y Radios de acuerdo

1 E-mail: manuel.palacios07@yahoo.com

2 E-mail: jose_a_olmedo@outlook.com

3 E-mail: erickvillalobos190892@hotmail.com

4 E-mail: jonathan.berrios@ues.edu.sv

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. MECÁNICA DE LA FATIGA	3
1.1.1. Principios de la fatiga.....	4
1.1.2. Características de las fallas por fatiga	6
1.1.3. La curva de Wöhler	7
1.1.4. Factores que influyen en la resistencia a la fatiga	10
1.1.5. Influencia de los concentradores de esfuerzo en la resistencia a la fatiga.....	13
1.1.6. Ensayos de fatiga por flexión rotativa	18
1.1.7. Fatiga al aire.....	19
1.1.8. Tipos de esfuerzo por fatiga	20
1.2. Mecánica de la fractura	23
1.2.1. Principio de fractura	23
1.2.2. Análisis de fallas	26
1.2.3. Condiciones para el inicio de fractura por fatiga	29
1.2.4. Tipos de fractura.....	30
1.3. Diagrama de fatiga (Esfuerzo vs número de ciclos a la fractura)	33
1.3.1. Zonas en el diagrama de fatiga.....	34
1.3.2. Esfuerzos fluctuantes.....	37
1.4. Análisis metalográfico.....	38
2. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	43
2.1. Flujograma del diseño experimental	43
2.2. Dimensionamiento de las probetas.....	44
2.3. Maquinado de las probetas	49
2.3.1. Proceso de maquinado de las probetas para los ensayos de fatiga.....	49
2.4. Recocido de las probetas de acero AISI 1020	51
2.5. Lijado y pulido de las probetas	53
2.6. Ensayo de fatiga por flexión rotativa	55
2.7. Curvas S-N aproximación lineal por mínimos cuadrados bajo norma ASTM E 739	59

2.7.1. Obtención de la curva S-N según la norma ASTM E 739.....	59
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	62
3.1. Ensayos de fatiga.....	62
3.2. Concentradores de esfuerzos por fatiga en las probetas de acero AISI 1020	77
4. DETERMINACIÓN DE COSTOS	80
4.1. Costos de materia prima	81
4.2. Costos por maquinado	81
4.3. Costos del tratamiento térmico de recocido.....	86
4.4. Costos de lijado y pulido.....	89
4.5. Costos por ensayos de fatiga	91
4.6. Resumen de los costos de preparación y ensayos de las probetas.....	95
CONCLUSIONES	96
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Curvas de Wöhler o curvas S-N.....	8
Fig. 1.2. Eje redondo con radio de acuerdo en flexión [7].	15
Fig. 1.3. Sensibilidad a la entalla en función de parámetros geométricos.	18
Fig. 1.4. Esquema de máquina para ensayos de fatiga por flexión rotativa.....	19
Fig. 1.5. Algunas relaciones esfuerzo-tiempo: a) Esfuerzo fluctuante con pulsaciones de alta frecuencia; b) y c) Esfuerzo fluctuante no sinusoidal; d) Esfuerzo fluctuante sinusoidal; e) Esfuerzo repetido; f) Esfuerzo sinusoidal completamente invertido.....	22
Fig. 1.6. Aumento de la longitud de la grieta a , desde una longitud inicial, a_i , como una función del conteo de ciclos de tres intervalos de esfuerzo, $(\Delta\sigma)^3 > (\Delta\sigma)^2 > (\Delta\sigma)^1$	25
Fig. 1.7. Regiones según el crecimiento de la grieta.....	26
Fig. 1.8. Aspectos de las zonas de la superficie de fractura por fatiga: A es la iniciación de la grieta por fatiga, B es la propagación de la grieta por fatiga, y C es la zona de ruptura por sobrecarga.	30
Fig. 1.9. Fracturas: a) Dúctil copa y cono en un acero al bajo carbono; y b) Frágil en un acero al alto carbono.	31
Fig. 1.10. El modelo tipo Chevron apunta hacia el origen de la fractura frágil en esta superficie de fractura.	32
Fig. 1.11. Combinaciones de modos de fractura se observan en superficies de fractura de tres probetas ensayadas con cargas aplicadas con impacto, las cuales fueron fracturadas a diferentes temperaturas: a) La fractura es casi en su totalidad de corte; b) La fractura es de corte y clivaje combinados; y c) de clivaje.	33
Fig. 1.12. Regiones en que se divide el diagrama S-N [7].....	35
Fig. 1.13. Bandas S-N de aleaciones representativas de aluminio, excluyendo las aleaciones forjadas.	36
Fig. 1.14. Micrografía del acero AISI 1020 en estado de entrega, sin atacar (100x).	39
Fig. 1.15. Micrografía del acero AISI 1020 en estado de entrega, sin atacar (1000x).....	39
Fig. 1.16. Micrografía del acero AISI 1020 en estado de entrega, atacado (500x).	39
Fig. 1.17. Micrografía del acero AISI 1020 en estado de entrega, atacado (1000x).	39
Fig. 1.18. Metalografía de una probeta AISI 1020 atacada químicamente: a) 100x; b) 200x; c) 500x; y d) 1000x.	40
Fig. 1.19. Diagrama Hierro Carbono.	41
Fig. 2.1. Flujograma del diseño experimental.....	44
Fig. 2.2. Máquina de fatiga por flexión rotativa con soporte simple.	45
Fig. 2.3. Esquema de una máquina de fatiga por flexión rotativa con soporte en viga (viga simplemente apoyada).	46

Fig. 2.4. Geometría de probeta para máquina con soporte en viga, según la norma de la ASTM designación E 466, cotas en mm.	46
Fig. 2.5. Esquema de diseño de máquina para ensayo de fatiga, se puede observar la longitud (<i>LDC</i>) que se utiliza en el cálculo de la resistencia a la fatiga.	47
Fig. 2.6. Dimensiones de probetas con diferentes radios de acuerdo donde R es la magnitud del radio de acuerdo, L es la longitud de la sección menor; las demás dimensiones permanecen constantes para los diferentes radios de acuerdo.....	48
Fig. 2.7. Torno CNC marca ALECOP, modelo Expert.	49
Fig. 2.8. Esquema del tratamiento térmico de recocido para alivio de esfuerzos residuales de un acero AISI 1020.....	52
Fig. 2.9. Equipo de protección para el proceso de tratamiento térmico recocido.....	53
Fig. 2.10. Colocación del lote de probetas en la cámara del horno para el tratamiento de recocido.	53
Fig. 2.11. Probetas de Acero AISI 1020 maquinadas y recocidas.	54
Fig. 2.12. a) Probeta maquinada y tratada térmicamente con recocido. b) Probeta lijada hasta lija 400.....	54
Fig. 2.13. Probetas pulidas y depositadas en recipientes con aceite mineral para evitar corrosión.....	55
Fig. 2.14. Esquema y componentes de la máquina de fatiga por flexión rotativa. 1 sensor de aproximación, 2 Husillo con alojamiento para la probeta, 3 Rodamiento de apoyo libre, 4 Escala de carga en Newton (no visible), 5 Balanza de muelle, 6 Volante de mano, 7 Interruptor de aproximación (no visible), 8 Guarda de protección, 9 Motor de accionamiento, 10 Interruptor de paro de emergencia, 11 Contactor, 12 Conector hembra WP14.20 (opcional) y 13 Guardamotor.	57
Fig. 2.15. Máquina de fatiga por flexión rotativa en funcionamiento.	58
Fig. 3.1. Representación gráfica $\log(S)$ vs $\log(N)$ de probetas de acero AISI 1020 ensayadas a fatiga por flexión rotativa para un radio de acuerdo de 8 mm.....	66
Fig. 3.2. Representación gráfica $\log(S)$ vs $\log(N)$ de probetas de acero AISI 1020 ensayadas a fatiga por flexión rotativa para un radio de acuerdo de 16 mm.....	71
Fig. 3.3. Representación gráfica $\log(S)$ vs $\log(N)$ de probetas de acero AISI 1020 ensayadas a fatiga por flexión rotativa para un radio de acuerdo de 40 mm.....	75
Fig. 3.4. Representación gráfica $\log(S)$ vs $\log(N)$ de probetas de acero AISI 1020 ensayadas a fatiga por flexión rotativa para tres radios de acuerdo de 8, 16 y 40 mm.	76
Fig. 3.5. Probeta de acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 8 mm ensayada por fatiga a flexión rotativa.	77

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Reactivos para ataque químico para examen microscópico.....	40
Tabla 1.2. Resultado final del ataque químico al acero AISI 1020.	41
Tabla 2.1. Tolerancias y/o ajustes especificados para probetas.	48
Tabla 2.2. Variación de longitud de la sección menor con respecto al radio de acuerdo.....	48
Tabla 2.3. Composición química del acero AISI 1020 según hoja técnica proporcionada por ABASTEINSA de C.V.	49
Tabla 2.4. Pasos para la fabricación de probetas para ensayos de fatiga en un torno CNC ALEXOP, modelo EXPERT.	51
Tabla 2.5. Número mínimo de probetas para caracterizar un material según la norma ASTM designación E 739.	60
Tabla 3.1. Resultados de ensayos de fatiga para determinar la resistencia a la fatiga de un acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 8 mm.	63
Tabla 3.2. Resultados de ensayos de fatiga, utilizados para determinación de la resistencia a la fatiga de un acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 8 mm.....	64
Tabla 3.3. Resultados del criterio de aproximación lineal por mínimos cuadrados para los ensayos de las probetas con radio de acuerdo de 8 mm.	65
Tabla 3.4. Resultados aproximados por el método lineal de mínimos cuadrados de ensayos de fatiga, utilizados para determinación de la resistencia a la fatiga de un acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 8 mm.	66
Tabla 3.5. Resultados de ensayos de fatiga para determinar la resistencia a la fatiga de un acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 16 mm.	67
Tabla 3.6. Resultados de ensayos de fatiga en logaritmo para determinar la resistencia a la fatiga de un acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 16 mm.....	68
Tabla 3.7. Resultados del criterio de aproximación lineal por mínimos cuadrados para los ensayos de las probetas con radio de acuerdo de 16 mm.	69
Tabla 3.8. Resultados aproximados por el método lineal de mínimos cuadrados de ensayos de fatiga, utilizados para determinación de la resistencia a la fatiga de un acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 16 mm.	70
Tabla 3.9. Resultados de ensayos de fatiga para determinar la resistencia a la fatiga de un acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 40 mm.	71
Tabla 3.10. Resultados de ensayos de fatiga en logaritmo para determinar la resistencia a la fatiga de un acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 40 mm.....	72
Tabla 3.11. Resultados del criterio de aproximación lineal por mínimos cuadrados para los ensayos de las probetas con radio de acuerdo de 40 mm.	73
Tabla 3.12. Resultados aproximados por el método lineal de mínimos cuadrados de ensayos de fatiga, utilizados para determinación de la resistencia a la fatiga de un acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 40 mm.....	74

Tabla 4.1. Detalle del costo de la materia prima de acero AISI 1020 ensayada a fatiga por flexión rotativa.	81
Tabla 4.2. Porcentaje de valor de la maquinaria luego de su uso o explotación.	82
Tabla 4.3. Detalle de costos por maquinado de las probetas de acero AISI 1020 para ensayos de fatiga por flexión rotativa.	86
Tabla 4.4. Detalle de costos por tratamiento térmico de recocido de las probetas de acero AISI 1020 para ensayos de fatiga por flexión rotativa.	89
Tabla 4.5. Detalle de costos por lijado y pulido de las probetas de acero AISI 1020 para ensayos de fatiga por flexión rotativa.	91
Tabla 4.6. Detalle de costos por ensayo de fatiga al aire por flexión rotativa de las probetas de acero AISI 1020.	95
Tabla 4.7. Resumen del costo por probeta de acero AISI 1020 ensayada a fatiga por flexión rotativa.	95

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

- a : Longitud de grieta
- a_p : Brazo de palanca
- A : Razón de amplitud
- \hat{A} : Estimador del parámetro A para mínimos cuadrados
- b : Exponente de resistencia a la fatiga o exponente de Basquin
- \hat{B} : Estimador del parámetro B para mínimos cuadrados
- c : Distancia medida desde la superficie del material hasta el eje neutro
- d : Diámetro menor del elemento
- dN : Diferencial de ciclos de esfuerzo
- D : Diámetro mayor del elemento
- Da : Diferencial de longitud de grieta
- D_p : Depreciación del equipo
- F : Carga aplicada
- F_a : Componente de la amplitud de la fuerza
- F_m : Componente de intervalo medio de la fuerza
- $F_{m\acute{a}x}$: Carga máxima aplicada
- $F_{m\acute{i}n}$: Carga mínima aplicada
- I : Momento de inercia respecto al eje neutro
- k : Número de probetas ensayadas
- K_f : Factor de reducción de resistencia a la fatiga
- K_{Ic} : Intensidad del esfuerzo crítico del metal sin daño
- K_o : Inverso del factor de reducción de resistencia a la fatiga

- K_t : Factor teórico o geométrico de concentración de esfuerzos a la fatiga
- L_{DC} : Brazo de palanca en la máquina de fatiga por flexión rotativa
- L : Valor residual
- L : Longitud de la sección menor de la probeta
- M : Momento flector
- M_b : Momento de flexión de forma triangular
- N : Número de ciclos de esfuerzo
- n : Vida útil de la máquina
- n_s : Número de niveles
- N_f : Ciclos de esfuerzo de fatiga por flexión rotativa
- P : Costo inicial
- P_r : Porcentaje de reproducibilidad
- Q : Carga aplicada en la máquina de fatiga por flexión rotativa
- q : Sensibilidad a la muesca o entalla del material
- R : Razón de esfuerzos
- R : Magnitud del radio de acuerdo de la probeta
- S : Amplitud real de esfuerzo o resistencia a la fatiga del material
- S_a : Esfuerzo producido por cargas alternantes
- S_e : Límite de fatiga
- S_f : Resistencia a la fatiga
- S_S : Coeficiente de resistencia a la fatiga
- S_i : Nivel de esfuerzo en ensayos de fatiga
- X : Variable independiente para análisis de mínimos cuadrados
- Y : Variable dependiente para análisis de mínimos cuadrados

- β : Ángulo de cojinete, coeficiente
- ΔK_I : Intervalo de intensidad del esfuerzo por ciclo
- $(\Delta K_I)_n$: Valor del umbral
- $\Delta\sigma$: Esfuerzo máximo menos esfuerzo mínimo
- $\mu_{Y|X}$: Valor esperado de Y dado X para mínimos cuadrados
- σ_a : Amplitud del esfuerzo
- σ_{ao} : Amplitud del esfuerzo nominal inducido por la carga F_a
- σ_m : Esfuerzo medio
- $\sigma_{m\acute{a}x}$: Esfuerzo máximo real
- $\sigma_{m\acute{i}n}$: Esfuerzo mínimo
- σ_{mo} : Esfuerzo medio nominal inducido por la carga F_m
- σ_o : Esfuerzo normal
- σ_r : Intervalo de esfuerzo
- σ_s : Esfuerzo estático o constante
- $2N_f$: Número de reversos a falla (1 ciclo)

INTRODUCCIÓN

El acero AISI 1020, por su composición, se utiliza en una gran variedad de componentes industriales los cuales requieren una dureza uniforme, alta ductilidad, poca resistencia al desgaste y a la corrosión, así como también un fácil maquinado y buena soldabilidad.

Sin embargo, en la industria con frecuencia existe una condición en la cual los elementos experimentan esfuerzos que varían o fluctúan entre ciertos niveles, estas y otras clases de carga que ocurren en elementos de máquinas producen esfuerzos que se llaman esfuerzos variables, repetidos, alternantes o fluctuantes. Estos esfuerzos producen fallas por fatiga, cuyas características de fractura son muy diferentes a la fractura dúctil o frágil estáticas y presentan condiciones críticas para el funcionamiento óptimo del elemento.

Para comprender estas fallas se tienen que tomar en consideración los radios de acuerdo (secciones que están entre la sección de agarre y la sección de ensayo de la probeta) durante el diseño de los componentes de máquinas y analizar cómo éstos inciden en el comportamiento a la fatiga de los materiales. Es por esto que se pretende fundamentar, con base en fuentes bibliográficas, cálculos y ensayos, la influencia que tienen los diferentes radios de acuerdo sobre las probetas de acero AISI 1020 durante los ensayos de fatiga al aire por flexión rotativa.

En el primer capítulo se presentan las definiciones principales de los conceptos involucrados en el estudio de los materiales sometidos a esfuerzos por fatiga. Se ha seleccionado información de diferentes estudios y documentos relacionados a la mecánica y principios de la fatiga, principalmente de la fatiga al aire por flexión rotativa, para analizar las características que presentan los materiales que han fallado por fatiga. Se presentan estudios que intentan explicar el fenómeno de la fatiga como las curvas de Wöhler. Se exponen los diferentes factores que influyen en la resistencia a la fatiga, enfatizando a los concentradores de esfuerzo, los tipos de esfuerzos que se producen por las

cargas aplicadas en fatiga, la mecánica, los principios y los tipos de fractura involucrados en el análisis de fallas por fatiga, la importancia del diagrama de fatiga y las zonas definidas en éste y el respectivo análisis metalográfico para el acero AISI 1020 recocido. Además, durante el desarrollo del primer capítulo se expresan las ecuaciones que definen el modelo matemático que describe el comportamiento del material al someterse a dichos esfuerzos.

En el segundo capítulo, se presentan las etapas del diseño experimental de los ensayos de fatiga al aire por flexión rotativa para probetas con los 3 diferentes radios de acuerdo seleccionados. Se presenta el flujograma para establecer un orden lógico en los procedimientos, los factores a considerar para el dimensionamiento de las probetas, las ecuaciones relacionadas a los parámetros involucrados en la máquina para ensayos de fatiga por flexión rotativa, la descripción del proceso de maquinado, el tratamiento térmico, el lijado y pulido de las probetas, la realización de los ensayos de fatiga al aire por flexión rotativa y la obtención de las curvas de interés para su posterior análisis.

En el tercer capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos de fatiga al aire por flexión rotativa para los 3 diferentes radios de acuerdo de las probetas de acero AISI 1020 bajo dos niveles de esfuerzo. Se utiliza la norma de la ASTM designación E 739 como fundamento para ensayar la cantidad de probetas utilizadas para desarrollar las curvas relacionadas a los radios de acuerdo. Se analizan dichos resultados y se explican las razones por la cual se utilizan aproximaciones lineales por el método de mínimos cuadrados al involucrar la dispersión de dichos resultados.

En el cuarto capítulo se presenta una determinación de costos detallado de los costos fijos y variables para el desarrollo de los ensayos de fatiga para este trabajo. Se detallan los costos de materia prima, los costos por maquinado, los costos del tratamiento térmico realizado, los costos de lijado y pulido de la superficie de las probetas y los costos relacionados a la utilización de la máquina para realizar los ensayos de fatiga al aire por flexión rotativa para finalmente determinar el costo total de cada probeta ensayada.

1. MARCO TEÓRICO

Diversos elementos de máquinas en la industria tales como engranes, levas y flechas son utilizados bajo cargas cíclicas o periódicas. Los esfuerzos cíclicos pueden ser producidos por cargas mecánicas variantes (como en ejes de motores eléctricos) o gradientes térmicos (molde frío que entra en contacto en reiteradas ocasiones con elementos de trabajo a altas temperaturas) [1].

En estas situaciones, el elemento de máquina falla a un nivel de esfuerzo menor que aquel en el cual ocurriría la falla en condiciones estáticas de carga. Las grietas generadas a partir de estas fallas crecen con cada ciclo de carga, propagándose transversalmente a través del material hasta que logran alcanzar una longitud lo bastante crítica para que el material fracture por sí mismo. Así, esto es conocido como falla por fatiga, siendo ésta la mayoría de fallas en los elementos mecánicos [1].

1.1. MECÁNICA DE LA FATIGA

La fatiga es un proceso de cambio estructural permanente, localizado y progresivo que se manifiesta en un material sometido a condiciones que producen esfuerzos en algún punto o puntos, que pueden culminar en grietas o fractura completa después de un número suficiente de fluctuaciones [2].

Las propiedades mecánicas de un material dependen de la estructura cristalina del mismo, siendo fuertemente afectadas principalmente por irregularidades puntuales (vacancias, sustitucionales, autointersticiales e intersticiales) y defectos lineales (dislocaciones de arista, helicoidales y mixtas) que se generan durante la solidificación y deformación plástica de los materiales metálicos [3].

Las vacancias son simplemente puntos de red vacíos en la estructura del material. Estos puntos deberían estar idealmente ocupados, sin embargo, se encuentran vacíos.

Los átomos sustitucionales reemplazan un átomo por un tipo distinto de átomo. Estos átomos sustitucionales ocupan el sitio de red normal, siendo de mayores diámetros que los átomos normales en la estructura cristalina, por lo que reducen los espaciados interatómicos circundantes, o siendo de menores diámetros ocasionando que átomos circundantes tengan espaciados interatómicos mayores [4].

Los átomos autointersticiales son átomos cuya posición no está definida por un punto de red, normalmente estos átomos se colocan en los intersticios que se forman entre los átomos originales de la misma especie, caso contrario para los átomos intersticiales los cuales se colocan en intersticios entre los átomos originales de diferente especie.

Las dislocaciones de arista son semiplanos extra de átomos insertados en la estructura cristalina. Para las dislocaciones helicoidales, cortando de manera parcial a través de un cristal perfecto y después torciendo el cristal en un espacio atómico y las dislocaciones mixtas tienen componentes de aristas y helicoidales, con una región de transición entre ellas [4].

Otros defectos que pueden surgir de la solidificación son suficientemente grandes de tal manera que se aprecian a simple vista, entre los cuales los más comunes son porosidad y cavidades por contracción [3].

A menudo un componente está sujeto a la aplicación de una carga cíclica que produce, en el interior del mismo, esfuerzos de compresión y tracción. Dicho esfuerzo puede ocurrir como resultado de rotación, flexión o vibración. Aun cuando el esfuerzo esté por debajo del límite elástico, el material puede fallar después de numerosas aplicaciones de dicha carga. Este tipo de falla se conoce como fatiga (falla por fatiga) [4].

1.1.1. PRINCIPIOS DE LA FATIGA

El descubrimiento de la fatiga ocurrió en el siglo XIX cuando varios investigadores en Europa observaron que los componentes de puentes y

ferrocarriles se agrietaban al ser sometidos a cargas repetidas. A medida que avanzaba dicho siglo y el uso de metales se expandía en la creciente utilización de máquinas, se registraron cada vez más fallas de componentes sometidos a cargas repetidas. A inicios del siglo XIX, A. Wöhler propuso un método por el cual se podía mitigar el fallo de los componentes de cargas repetidas y, en algunos casos, eliminarse. Este método resultó en el enfoque del diagrama de esfuerzo-vida y en el enfoque del modelo de prueba de componentes para el diseño de fatiga [2].

Se ha reconocido, desde 1850, que un metal sujeto a esfuerzos repetidos o fluctuantes fallará a un esfuerzo mucho más bajo que el necesario para producir la fractura en una sola aplicación de la carga. Las fallas ocurridas en condiciones de carga dinámica se llamaron fallas por fatiga, seguramente porque se observaron casi siempre después de un período considerablemente largo de servicio [5].

Son hipótesis importantes de la resistencia de materiales que el cuerpo que se estudia es continuo, homogéneo e isotrópico. Un cuerpo continuo es el que no contiene huecos o espacios vacíos de ninguna clase. Un cuerpo es homogéneo cuando tiene propiedades idénticas en todos sus puntos. Un cuerpo se considerará isotrópico respecto a alguna propiedad siempre que ésta no varíe con la dirección u orientación. Una propiedad que varíe con la orientación respecto a algún sistema de ejes coordenados es anisotrópica [5].

Los materiales empleados en ingeniería, tales como el acero, la fundición de hierro o el aluminio, parecen que cumplen estas condiciones cuando se les observa en escala grande, pero si se les mira a través de un microscopio óptico es fácil comprobar que pueden ser cualquier cosa menos homogéneos e isotrópicos. La mayoría de los metales están constituidos por más de una fase, cada una con diferentes propiedades mecánicas, por lo que a escala microscópica son heterogéneos. La razón por la cual las ecuaciones de resistencia a la fatiga de materiales describen el comportamiento de los metales está en que, en general, los granos cristalinos son tan pequeños respecto a una probeta de volumen macroscópico que cabe considerar al material como si fuera

estadísticamente homogéneo e isótropo. Sin embargo, cuando los metales se deforman severamente en una dirección particular, como ocurre en la laminación y en la forja, las propiedades mecánicas pueden ser anisotrópicas a nivel de macroescala [5].

La fatiga adquiere cada vez más interés debido al desarrollo creciente de equipos en los que el material está sometido a cargas repetidas y vibraciones, como ocurre en los automóviles, los aviones, las bombas, las turbinas, etc. En la actualidad se ha afirmado frecuentemente que, por lo menos, el 90% de todas las rupturas en el servicio se producen por fatiga [5].

Extensos estudios de engranes carburizados y endurecidos para camiones de gran tonelaje, máquinas para herramienta, máquinas para minería, motores de diésel, entre otros, presentaron que el 38% de las fallas se originaron por problemas de la superficie (formación de pequeños agujeros, descascaramiento, trituración y rayado), 24% de fatiga por flexión, 15% por impacto y 23% por otras causas. De un análisis detallado de las fallas realizado por compañías de acero, fabricantes de automóviles y fabricantes de equipo eléctrico, casi el 50% de las fallas puede atribuirse a defectos en el diseño, siendo el resto distribuido entre problemas de producción y de servicio [3].

1.1.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS FALLAS POR FATIGA

Desde hace tiempo se sabe que existe información valiosa en las superficies de fractura de los metales. A lo largo de los años, se han implementado varios enfoques para obtener e interpretar esta información [6].

Una falla por fatiga no proporciona una advertencia; es decir, bajo efectos de cargas dinámicas cíclicas, falla de manera repentina en comparación con las producidas por cargas estáticas, por ende, es más peligrosa. Caso contrario ocurre cuando los elementos de máquinas fallan estáticamente puesto que el esfuerzo ha sobrepasado el límite elástico; el elemento se reemplaza antes de que suceda la fractura. De esta manera la falla estática proporciona una

advertencia visible. Es relativamente simple diseñar contra la falla estática porque el conocimiento que se tiene acerca de este tipo de falla es muy completo, ya que dicho mecanismo es relativamente sencillo [7].

Las fallas por fatiga son los tipos más comunes de fractura en máquinas y, como se dijo anteriormente, probablemente constituyen no menos del 90% de todas las fracturas. Tales fracturas se desarrollan después de un gran número de aplicaciones de carga, generalmente a un nivel de esfuerzo fluctuante inferior al esfuerzo de fluencia del material [7].

Las rupturas por fatiga se pueden reconocer usualmente por el aspecto de la superficie de fractura, que presenta una región lisa, debida al frotamiento que ocurre cuando se propaga la grieta a través de la sección, y una región rugosa, originada cuando el miembro ha fracturado dúctilmente por haber disminuido su sección transversal al no poder soportar la carga. Es frecuente que el progreso de la fractura aparezca señalado por una serie de marcas anulares, que parecen propagarse, desde el punto de iniciación de la falla, como el frente de las olas hacia el interior de una playa. Además, la falla se inicia usualmente en un punto de concentración de esfuerzos, tal como una esquina aguda o entalla, o en una concentración de esfuerzos de origen metalúrgico, tal como una inclusión [5].

A nivel macroscópico una falla por fatiga tiene una apariencia similar a la fractura frágil estática a tracción, dado que las superficies de la fractura son planas (perpendiculares al eje de la carga aplicada) y con ausencia de una marcada deformación. Sin embargo, las características de fractura de una falla por fatiga son muy diferentes a la fractura frágil estática ya que su desarrollo se puede subdividir en tres etapas [7].

1.1.3. LA CURVA DE WÖHLER

El método fundamental para presentar los datos de fatiga es la curva de Wöhler, también llamada curva de fatiga o curva *S-N*, en la cual se colocan los esfuerzos (*S*) en el eje de las ordenadas y el número de ciclos (*N*) en el eje de

las abscisas. Esta curva representa la duración de la probeta, expresada en número de ciclos, hasta la ruptura para el máximo esfuerzo producido. La mayoría de ensayos de fatiga se han realizado empleando las máquinas de fatiga por flexión rotativa en las que el esfuerzo medio es nulo. En la Fig. 1.1 se presentan las curvas de Wöhler típicas de este tipo de ensayos [5].

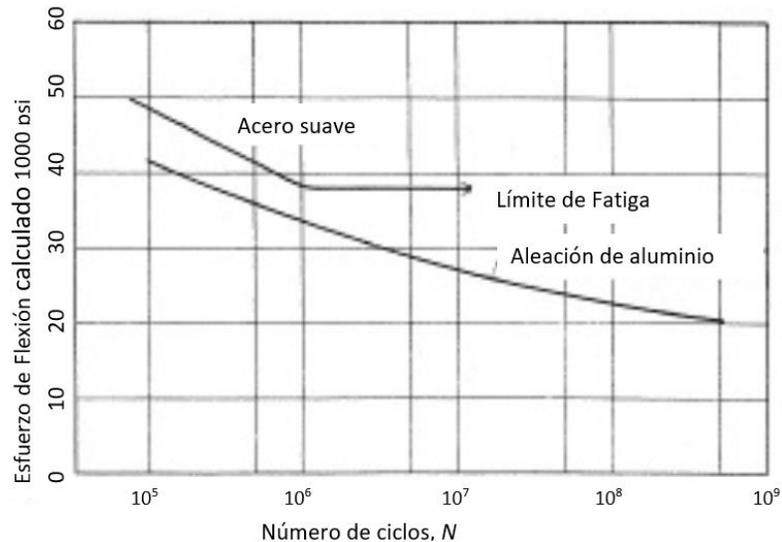


Fig. 1.1. Curvas de Wöhler o curvas S-N.

Según la Fig. 1.1, el número de ciclos que dura una probeta antes de la ruptura aumenta al disminuir el esfuerzo. N es el número de ciclos de esfuerzo necesarios para producir la fractura completa de la probeta; es decir, es la suma del número de ciclos para que se inicie una grieta y el número de ciclos que transcurren durante la propagación de la grieta hasta la ruptura total. Las dos curvas ilustran la cantidad de ciclos que un material puede resistir sin que se produzca una ruptura. Este número de ciclos representa la resistencia a la fatiga del material sometido a ese nivel de esfuerzo [5].

La mayoría de los metales no ferrosos, como las aleaciones de aluminio, las de magnesio y cobre, tienen una curva de Wöhler cuya pendiente disminuye progresivamente al aumentar el número de ciclos aproximándose a una horizontal, pero sin llegar a serlo nunca, es así como se presenta en la curva

inferior de la Fig. 1.1. No se conocen las razones por las que unos materiales tienen un límite de fatiga y otros no [5].

En el caso de ensayar un metal (generalmente ferroso) y encontrar un valor de límite de fatiga, la curva debe construirse en dos partes: La primera parte, referente a la resistencia a la fatiga, que sea realiza aplicando el modelo de Basquin y la segunda parte para determinar el límite de fatiga por cualquiera de los métodos existentes, como por ejemplo el método de la escalera, el cual es un método estadístico basado en el suceso menos frecuente, para obtener una aproximación del valor por debajo del cual no se presentará falla. [5].

Para determinar la resistencia a la fatiga a través del modelo de Basquin, los datos de fatiga presentados por Wöhler se grafican en una curva S-Log N; donde S representa la amplitud del esfuerzo y N el número de ciclos a falla. En forma resumida se puede expresar que el aporte de Basquin consistió en graficar los puntos con los que se obtuvo la curva de Wöhler en un papel Log-Log, allí se dio cuenta que el resultado se ajustaba bastante bien a una recta para la región de alto ciclaje. De este modo se establece la ley exponencial de la fatiga.

Usando los esfuerzos nominales o ingenieriles en lugar de los reales, la amplitud de esfuerzo puede ser descrita como la resistencia a la fatiga o vida a la fatiga por la Ec. 1.1.

$$S = S_S(2N_f)^b \quad (1.1)$$

donde:

S es la amplitud real de esfuerzo o resistencia a la fatiga del material,

S_S es el coeficiente de resistencia a la fatiga

$2N_f$ es el número de reversos a falla (1 ciclo igual a dos reversos), y

b es el exponente de resistencia a la fatiga o exponente de Basquin

La ecuación de Basquin también puede ser representada por una ecuación potencial simple como en la Ec. 1.2.

$$S = S_f(N_f)^b \quad (1.2)$$

Tanto S_f como b son propiedades del material [8].

1.1.4. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RESISTENCIA A LA FATIGA

Existe una diversidad de factores que afectan la resistencia a la fatiga como lo son, la condición superficial del material, micro estructura (tamaño de grano), concentradores de esfuerzo, temperatura o ambientes corrosivos. Estos factores afectan de manera tal que acortan la vida de los elementos que los poseen, entre estos factores se tienen [5]:

➤ Condición superficial.

Por lo general la mayoría de las fallas por fatiga se inician en la superficie. En estados de carga tales como flexión y torsión, el esfuerzo máximo se produce en la superficie, desencadenando por lo tanto el proceso de formación de grietas. Las condiciones superficiales afectan significativamente las propiedades a la fatiga [5].

➤ Rugosidad superficial.

Las superficies con demasiada rugosidad disminuyen la resistencia a la fatiga. Las superficies ásperas contienen sitios donde los esfuerzos son mayores y favorecen el inicio de grietas microscópicas que pueden avanzar y causar fallas por fatiga, los procesos de manufactura y maquinado producen asperezas en la superficie es por esto que se necesita pulir la superficie para disminuir las fallas por fatiga [5].

➤ Cambios en las propiedades superficiales.

Debido a la influencia que tiene la condición superficial sobre la resistencia a la fatiga, cualquier fenómeno que cambie la resistencia a la fatiga de la superficie del material alterará significativamente las propiedades a la fatiga. Así, los tratamientos superficiales tales como la cementación y la nitruración

en los aceros suelen mejorar las propiedades a la fatiga. En cambio, el electroplaqueado de la superficie suele acarrear la disminución del límite de fatiga del acero. Los recubrimientos anódicos son usualmente beneficiosos, mientras los recubrimientos catódicos producen disminución de las propiedades. Los recubrimientos de zinc y de cadmio son anódicos respecto al acero y producen mejoras en las propiedades, sobre todo en condiciones de corrosión-fatiga. El cromo y el níquel son catódicos respecto al acero y el electroplaqueado con estos metales produce indeseables esfuerzos residuales y posible agrietamiento por hidrógeno [5].

La nitruración es el proceso de endurecimiento superficial para aceros de aleación donde se calienta al metal a 514 °C en una atmósfera de nitrógeno, casi siempre en amoníaco gaseoso, seguido por un enfriamiento lento. Con la nitruración se puede aumentar la resistencia a la fatiga en un 50% o más [9].

La carburización es un proceso para realizar una cementación a la superficie del metal con el fin de endurecer dicha parte para resistir el desgaste. La ventaja del endurecimiento superficial consiste en que cuando la superficie adquiere la dureza necesaria para resistir el desgaste, el núcleo permanece en una forma más dúctil y resistente al impacto y a la fatiga [9].

La carburización tiene algunas variantes que permiten al diseñador adaptar las propiedades para cumplir requisitos específicos. La exposición a la atmósfera con carbono se hace a una temperatura aproximada de 920 °C y suele requerir 8 h. En cementación gaseosa la pieza se temple de inmediato, la cual alcanza la máxima resistencia, aunque la superficie que se obtiene es relativamente frágil. En el caso de cementación sólida, se deja enfriar una pieza lentamente después de carburizarla. A continuación, se recalienta a unos 815 °C y se temple, luego se aplica un revenido a la temperatura relativamente bajas entre 150 y 230 °C para aliviar los esfuerzos residuales originados durante el temple [9].

Las condiciones particulares empleadas en la obtención del recubrimiento pueden tener un efecto apreciable en las propiedades a la fatiga, puesto que

producen a veces grandes variaciones en los esfuerzos residuales, adherencia, porosidad y dureza del plaqueado [5].

El cromado y el niquelado no son recomendables para piezas sometidas a fatiga, a menos que se sometan a un proceso de granallado [5].

Los esfuerzos residuales en las capas superficiales de las probetas o piezas de máquinas, ya sean inducidos intencionalmente o accidentalmente, juegan un papel importante en las propiedades a la fatiga. Si los esfuerzos inducidos son de tracción la resistencia a la fatiga disminuye, por el contrario, si son de compresión entonces la resistencia a la fatiga mejora [5].

Como se mencionó anteriormente, los esfuerzos de compresión mejoran la vida a la fatiga. Esto explica por qué a la grieta se le hace más difícil avanzar dentro de un campo de esfuerzos de compresión. Existen varios medios comunes para producir esfuerzos superficiales de compresión, se citarán dos de ellos:

- ✓ Chorreado con granalla: Consiste en disparar a la superficie de la pieza con un chorro de granallas (como perdigones) de acero, de hierro fundido, de cáscara de nuez o de cualquier otro material. La granalla más dura se aplica a piezas de acero y la más blanda a metales blandos no ferrosos [5].
 - ✓ Bruñido con rodillos: Resulta particularmente adecuado para piezas grandes; se usa con frecuencia en zonas críticas de cigüeñales y en superficies de asiento de ferrocarril [5].
- Temperatura de ensayo.
- Los ensayos de fatiga por flexión rotativa generalmente se llevan a cabo a temperatura ambiente. Sin embargo, se tienen dos situaciones, estas son:
- ✓ Fatiga a temperaturas bajas. Los ensayos de fatiga de los metales, a temperaturas inferiores al ambiente presentan que la resistencia a la fatiga aumenta con el descenso de la temperatura. Aunque los aceros se hacen más sensibles a la entalla en fatiga a temperaturas bajas, no se tiene pruebas de cambios bruscos en las propiedades a la fatiga por debajo de una temperatura de transición de dúctil a frágil.

- ✓ Fatiga a temperaturas elevadas. En general, la resistencia a la fatiga de los metales, disminuye al aumentar la temperatura por encima del ambiente. Es una excepción el acero suave, que presenta un máximo de resistencia a la fatiga a temperaturas de entre 200 y 300 °C [5].
- Ambiente durante el ensayo.

Los datos de resistencia a la fatiga se miden, típicamente, al estar el espécimen al aire. Las condiciones de operación pueden exponer un componente al agua, soluciones salinas, u otros ambientes corrosivos que pueden reducir en forma apreciable la resistencia a la fatiga [9].

La corrosión sin la acción de las cargas cíclicas produce generalmente la picadura de las superficies metálicas, estas picaduras actúan como entallas y aminoran la resistencia a la fatiga. Cuando la corrosión actúa en combinación con cargas cíclicas, la disminución de la resistencia a la fatiga se hace más pronunciada, por lo que esta combinación de factores acelera la propagación de grietas [5].
- Micro-estructura del metal de ensayo.

El tamaño de grano influye grandemente en la propagación de dislocaciones y grietas, para un metal con tamaño de grano basto (pocos bordes de grano) la resistencia a la fatiga es menor en comparación con ese mismo metal con un tamaño de grano fino (abundancia de bordes de grano), ya que las fronteras entre granos requieren de una gran energía para romperse [3].

1.1.5. INFLUENCIA DE LOS CONCENTRADORES DE ESFUERZO EN LA RESISTENCIA A LA FATIGA

Cualquier discontinuidad en un elemento de máquina altera la distribución del esfuerzo en las inmediaciones de la discontinuidad, de manera que las ecuaciones elementales del esfuerzo ya no describen el estado de esfuerzo en el elemento. A estas discontinuidades se les denomina intensificadores de

esfuerzos, mientras que a las regiones en las cuales ocurren se les llama áreas de concentración del esfuerzo [7].

La distribución de esfuerzos en la sección transversal de un elemento sometido a una carga axial no es uniforme cerca del extremo donde se aplica la carga y se vuelve uniforme a medida que se aleja del mismo, de manera similar sucede con las configuraciones geométricas como agujeros, ranuras, muescas, chaveteros y radios de acuerdo, presentándose en ellos una distribución no uniforme en sus cercanías [10].

La concentración de esfuerzos provoca alguna irregularidad no inherente en el elemento, como marcas de herramientas, agujeros, estrías, ranuras o roscas [7].

Debido a que los sitios donde existen concentraciones de esfuerzos son los más probables para el inicio de una grieta, es necesario contabilizar de alguna manera este efecto, para considerarlo en el cálculo de la resistencia a la fatiga. Sin embargo, los factores de concentración de esfuerzos utilizados para el análisis en el comportamiento estático no son útiles en problemas de fatiga [10].

Se emplea un factor teórico o geométrico de la concentración de esfuerzos (K_t) para relacionar el esfuerzo máximo real ($\sigma_{m\acute{a}x}$) en la discontinuidad con el esfuerzo nominal (σ_0). Los factores se definen por medio de la Ec. 1.3 [7].

$$K_t = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_0} \quad (1.3)$$

donde K_t se usa para esfuerzos normales. El esfuerzo nominal (σ_0) es más difícil de definir. A menudo se calcula el esfuerzo mediante las ecuaciones elementales del esfuerzo y el área neta [7].

El subíndice t en K_t significa que el valor de este factor de concentración de esfuerzos sólo depende de la geometría de la pieza. Es decir, el material particular que se haya utilizado no tiene efecto en el valor de K_t . Ésta es la razón por la que se llama factor teórico de concentración de esfuerzos [7].

El análisis de las formas geométricas para determinar los factores de concentración de esfuerzos se convierte en un problema difícil y no se encuentran muchas soluciones. La mayoría de los concentradores de esfuerzos se determinan por medio de técnicas experimentales [7].

De la Fig. 1.2 se pueden obtener los factores de concentración de esfuerzos de una variedad de geometrías [7].

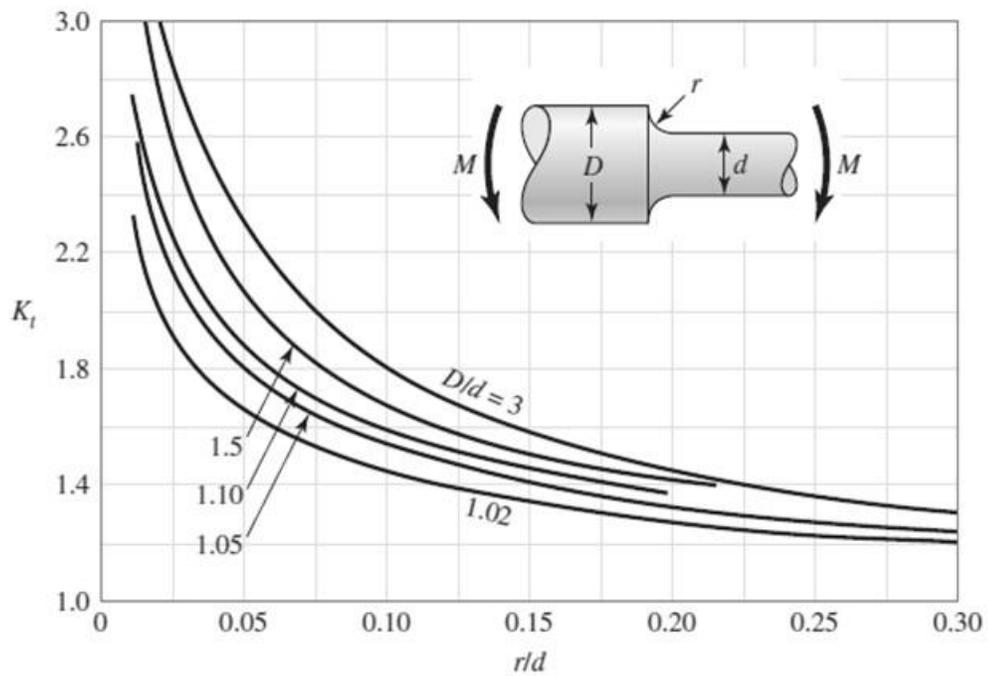


Fig. 1.2. Eje redondo con radio de acuerdo en flexión [7].

El esfuerzo nominal se calcula en base a la Ec. 1.4, Ec. 1.5 y Ec. 1.6.

$$\sigma_0 = \frac{Mc}{I} \quad (1.4)$$

$$c = \frac{d}{2} \quad (1.5)$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (1.6)$$

donde:

σ_0 es el esfuerzo normal nominal,

M es el momento flector,

c es la distancia medida desde la superficie del material hasta el eje neutro,

I es el momento de inercia respecto del eje neutro, y

d es el diámetro menor del elemento.

El momento flector se calcula sobre la base de las ecuaciones proporcionadas por el fabricante en el manual de la máquina para ensayos de flexión rotativa al aire, tal como se presenta en la Ec. 1.7.

$$M = F * a_p \quad (1.7)$$

donde:

F es la carga aplicada, y

a_p es el brazo de palanca, según el fabricante es de 100.5 mm

El brazo de palanca a_p real, varía en función del tamaño del radio de empalme.

La cantidad por la que se debilita un elemento de máquina, por la presencia de un concentrador de esfuerzos (muesca), al considerar tanto el material como la agudeza de la muesca, se define por la Ec. 1.8 [9].

$$K_f = \frac{\text{Límite de resistencia a la fatiga de un espécimen sin muesca}}{\text{Límite de resistencia a la fatiga de un espécimen con muesca}} \quad (1.8)$$

El factor K_f se conoce como factor de reducción de resistencia a la fatiga. Este factor se podría determinar en una prueba real. Sin embargo, en el caso típico, se determina al combinar el factor de concentración de esfuerzos K_t

definido en la Ec. 1.3 y un factor del material, llamado sensibilidad a la muesca, el cual se define en la Ec. (1.9) [9].

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (1.9)$$

Cuando el factor de sensibilidad a la muesca q es conocido, se emplea en términos generales para poder encontrar, el factor K_f en función del factor K_t que depende exclusivamente de aspectos geométricos, lo cual conduce a la Ec. 1.10 [9].

$$K_f = 1 + q (K_t - 1) \quad (1.10)$$

Si no existen entallas entonces $K_f = K_t$. El factor K_o se obtiene según la Ec. 1.11.

$$K_o = \frac{1}{K_f} \quad (1.11)$$

Para la obtención de q , es necesario emplear el diagrama que se presenta en la Fig. 1.3.

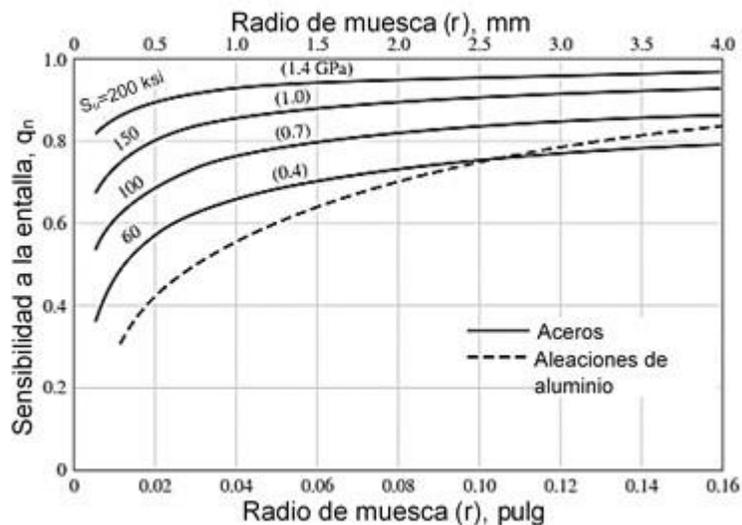


Fig. 1.3. Sensibilidad a la entalla en función de parámetros geométricos.

1.1.6. ENSAYOS DE FATIGA POR FLEXIÓN ROTATIVA

Un método común para medir la resistencia a la fatiga de un material es el ensayo de la viga en voladizo rotatoria Fig. 1.4. Uno de los extremos de la probeta cilíndrica maquinada se sujeta al eje de un motor. En el extremo opuesto se suspende un peso. Inicialmente la probeta tiene un esfuerzo de tracción actuando sobre la superficie superior, en tanto que la superficie inferior está sometida a compresión. Cuando la probeta gira 90°, los puntos que inicialmente estaban bajo tracción y compresión no están sujetos a esfuerzo alguno. Después de una media revolución de 180°, el material originalmente bajo tracción está ahora bajo compresión. Por lo que el esfuerzo en cualquier punto pasa a través de un ciclo sinusoidal completo desde un esfuerzo máximo de tracción, hasta un esfuerzo máximo de compresión [4].

Después de un número suficiente de ciclos, la probeta puede fallar. Generalmente, se ensayan una serie de probetas a diferentes esfuerzos. Los resultados se presentan graficando el esfuerzo en función del número de ciclos para la falla [4].

Las máquinas para realizar ensayos de fatiga en ciclos de esfuerzos repetidos o invertidos pueden clasificarse de acuerdo con el tipo de esfuerzo producido:

- i) Máquinas para ciclos de esfuerzo axial,
- ii) Máquinas para ciclos de esfuerzo flexionante, y
- iii) Máquinas para ciclos de esfuerzos cortantes torsionales.

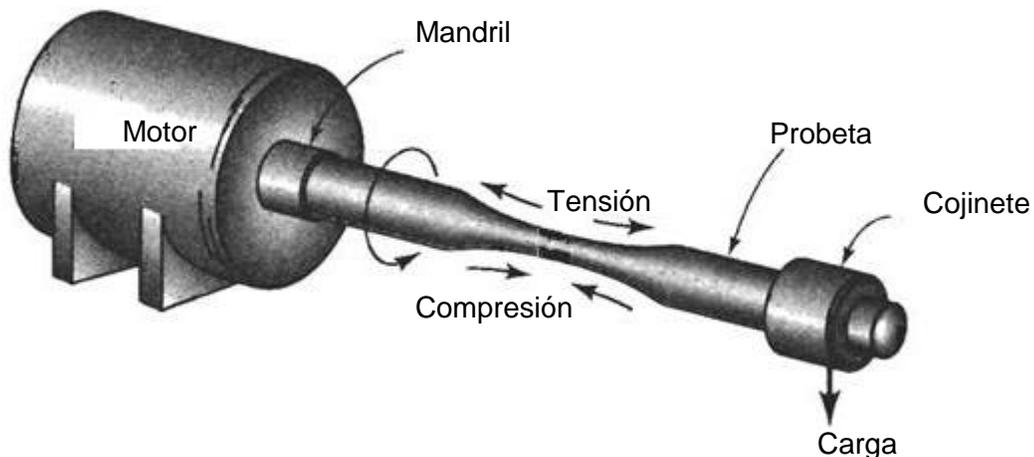


Fig. 1.4. Esquema de máquina para ensayos de fatiga por flexión rotativa.

1.1.7. FATIGA AL AIRE

Los ensayos de fatiga en ambiente neutro (fatiga al aire), hacen que la falla se atrase más de lo que puede esperarse en comparación de una combinación de efectos de cargas de fatiga a corrosión [11].

Para la fractura por fatiga con corrosión se ha propuesto que las picaduras iniciales por corrosión actúan como altos concentradores de esfuerzo; siendo el fondo de estas picaduras más anódicos que el resto del metal, la corrosión progresa en profundidad, ayudada por la destrucción de la película de óxido que producen los esfuerzos cíclicos [5].

Los ensayos de fatiga al aire no se ven afectados por la velocidad de los ensayos en un intervalo de aproximadamente 1000 a 12000 ciclos/min tal y como puede verse en los ensayos en un ambiente corrosivo [5]

Sin embargo, aun en los ensayos de fatiga realizados al aire y a temperatura ambiente interviene la fatiga con corrosión. Ensayos efectuados con cobre han mostrado que la resistencia a la fatiga era más elevada en un vacío parcial que en el aire. Al igual que los ensayos realizados separadamente en atmósferas de vapor de agua de oxígeno han presentado poca disminución respecto a la resistencia a la fatiga en vacío, se llega a la conclusión que el vapor de agua actúa como catalizador para aminorar la resistencia a la fatiga en el aire y, en consecuencia, la humedad relativa del aire puede considerarse como una variable a tener en consideración en los ensayos de fatiga [5].

1.1.8. TIPOS DE ESFUERZO POR FATIGA

A menudo, los esfuerzos fluctuantes sobre la maquinaria adoptan la forma de un patrón sinusoidal debido a la naturaleza de algunas máquinas rotatorias. Sin embargo, también ocurren otro tipo de patrones, algunos muy irregulares. Se ha determinado que en los patrones periódicos que presentan un solo máximo y un solo mínimo de la fuerza, la forma de la onda no resulta fundamental, pero los picos en el lado alto (máximo) y en el lado bajo (mínimo) son importantes. En consecuencia, $F_{máx}$ y $F_{mín}$ en un ciclo de fuerza se emplean para caracterizar el patrón de la fuerza. También es cierto que al variar por arriba y por debajo de alguna línea base resulte igualmente eficaz para caracterizar el patrón de la fuerza. Si la fuerza mayor es $F_{máx}$ y la fuerza menor es $F_{mín}$, se construye una componente uniforme y una alternante como se presenta en la Ec. 1.12 [7].

$$F_m = \frac{F_{máx} + F_{mín}}{2} \quad F_a = \frac{F_{máx} - F_{mín}}{2} \quad (1.12)$$

Siendo F_m la componente de intervalo medio de la fuerza y F_a la componente de la amplitud de la fuerza [7].

Ahora bien, transformando estas fuerzas a esfuerzos, son representados de la siguiente manera [7]:

σ_{\min} es el esfuerzo mínimo

σ_{\max} es el esfuerzo máximo

σ_a es el componente de la amplitud

σ_m es el componente de esfuerzo medio

σ_r es el intervalo de esfuerzo

σ_s es el esfuerzo estático o constante

Como se citó antes, existen diferencias dentro de estos esfuerzos que están sometiendo al material. En la Fig. 1.5 se representan estos tipos de patrones de ciclos de esfuerzos aplicados [7].

El esfuerzo constante, o estático, no es el mismo que el esfuerzo medio; de hecho, puede tener cualquier valor entre σ_{\min} y σ_{\max} . El estado constante existe debido a una carga fija o a una precarga aplicada a la parte, y por lo general es independiente de la parte variante de la carga. Por ejemplo, un resorte helicoidal de compresión siempre está cargado en un espacio más corto que la longitud libre del resorte. El esfuerzo creado por esta compresión inicial se llama componente constante o estática del esfuerzo. No es la misma que el esfuerzo medio de la Ec. 1.13 [7].

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$
$$\sigma_m = \left| \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \right| \tag{1.13}$$

Además de la Ec. 1.13, la razón de esfuerzo está dada por la Ec. 1.14 [7].

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (1.14)$$

La razón de amplitud está dada por la Ec. 1.15 [7].

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (1.15)$$

También, se definen y emplean en conexión con los esfuerzos fluctuantes [7].

En la Ec. 1.13 se emplean los símbolos σ_a y σ_m , como las componentes del esfuerzo en la ubicación bajo estudio. Lo anterior significa que, en ausencia de una muesca, σ_a y σ_m son iguales a los esfuerzos nominales σ_{a0} y σ_{m0} inducidos por las cargas F_a y F_m , respectivamente; en presencia de una muesca son $K_f \sigma_{a0}$ y $K_f \sigma_{m0}$, respectivamente, siempre y cuando el material permanezca sin deformación plástica. En otras palabras, el factor de concentración de esfuerzo a la fatiga K_f se aplica en ambas componentes [7].

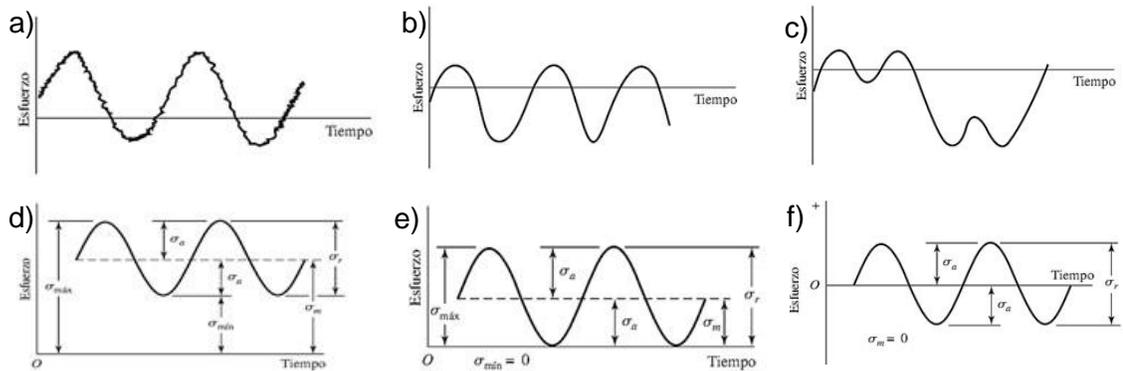


Fig. 1.5. Algunas relaciones esfuerzo-tiempo: a) Esfuerzo fluctuante con pulsaciones de alta frecuencia; b) y c) Esfuerzo fluctuante no sinusoidal; d) Esfuerzo fluctuante sinusoidal; e) Esfuerzo repetido; f) Esfuerzo sinusoidal completamente invertido.

1.2. MECÁNICA DE LA FRACTURA

Las cargas aplicadas, de manera fluctuante y repetida, que producen esfuerzos llamados esfuerzos cíclicos, originan fallos por fatiga en los materiales metálicos [1].

La falla por fatiga es debida a las grietas que se generan y propagan a través del metal. Por lo general, el origen de la grieta tiene lugar en una discontinuidad del material donde el esfuerzo cíclico presenta su máximo. Las discontinuidades pueden surgir debido a [12]:

- ✓ Cambios de sección transversal, cuñeros, orificios, entre otros.
- ✓ Elementos de máquinas que giran y/o se deslizan entre sí bajo presión alta constante, desarrollando esfuerzos de contacto concentrados por debajo de la superficie.
- ✓ Falta de precaución en las localizaciones de estampados, marcas de herramientas, raspaduras y rebabas.
- ✓ Composición química del material después de algún proceso de laminado, forjado, fundido, estirado, calentado, entre otros.

Cabe destacar que las diferentes condiciones que pueden acelerar el inicio de la grieta son las temperaturas elevadas, ciclos de temperaturas, un entorno corrosivo y ciclos de alta frecuencia.

1.2.1. PRINCIPIO DE FRACTURA

La velocidad y la dirección que toma la propagación de la grieta por fatiga está controlada de manera influyente por esfuerzos focalizados y por la estructura del material en donde se produjo la grieta. Las grietas crecerán a lo largo de planos normales a los esfuerzos en tracción máximos. Por eso, el crecimiento de la grieta debe explicarse mediante el mecanismo de fractura [1].

La primera fase de la nucleación de la grieta por fatiga se designó como etapa I de fatiga. Se supone que el deslizamiento de cristal que se extiende a

través de varios granos contiguos, inclusiones e imperfecciones superficiales desempeña un papel importante. Como la mayor parte de este fenómeno es invisible para el observador, sólo se dice que la etapa I involucra a varios granos [1].

La segunda fase, de la propagación de la grieta, se llama etapa II de fatiga. El avance de la grieta (esto es, la creación de una nueva área de grieta) produce evidencia que puede observarse en la micrografía de un microscopio electrónico. El crecimiento de la grieta es ordenado.

La fractura final ocurre durante la etapa III de fatiga, aunque no se tiene fatiga involucrada. Cuando la grieta es suficientemente grande, de forma que $K_I = K_{Ic}$ para la amplitud del esfuerzo involucrado, entonces K_{Ic} es la intensidad del esfuerzo crítico del metal sin daño, y existe una falla catastrófica, súbita de la sección transversal restante en sobrecarga a tracción. La etapa III de la fatiga se asocia con una rápida aceleración del crecimiento de la grieta finalizando con la fractura [12].

Así, las grietas por fatiga surgen y crecen cuando los esfuerzos varían y existe alguna tracción en cada ciclo de esfuerzo. Considere que el esfuerzo fluctúa entre los límites de $\sigma_{mín}$ y $\sigma_{máx}$, donde el intervalo del esfuerzo está definido como $\Delta\sigma = \sigma_{máx} - \sigma_{mín}$. Para $\Delta\sigma$, el intervalo de intensidad del esfuerzo por ciclo es según la Ec. 1.16 [12].

$$\Delta K_I = \beta(\sigma_{máx} - \sigma_{mín})\sqrt{\pi a} = \beta\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1.16)$$

Para obtener los datos de resistencia a la fatiga, se ensaya cierta cantidad de probetas del mismo material a distintos niveles de $\Delta\sigma$. Las grietas surgen en una superficie libre o una gran discontinuidad, o muy cerca de ellas. Bajo el supuesto de una longitud de grieta inicial de a_1 el crecimiento de la grieta como una función del número de ciclos de esfuerzo N dependerá de $\Delta\sigma$, si ΔK_I está por debajo de algún valor de umbral $(\Delta K_I)_n$ la grieta no crece. En la Fig. 1.6 se

presenta la longitud de la grieta a como una función de N para los tres niveles de esfuerzo $(\Delta\sigma)_3 > (\Delta\sigma)_2 > (\Delta\sigma)_1$ donde $(\Delta K_I)_3 > (\Delta K_I)_2 > (\Delta K_I)_1$ [7].

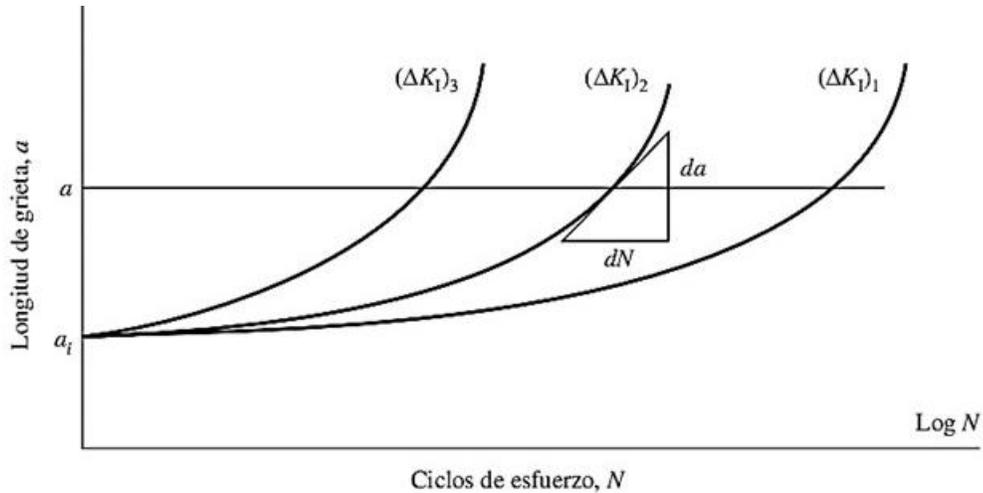


Fig. 1.6. Aumento de la longitud de la grieta a , desde una longitud inicial, a_i , como una función del conteo de ciclos de tres intervalos de esfuerzo, $(\Delta\sigma)_3 > (\Delta\sigma)_2 > (\Delta\sigma)_1$.

Cuando da/dN se mide en la Fig. 1.6 y se grafica en coordenadas log-log, los datos de diferentes intervalos de esfuerzo se superponen, lo que da lugar a una curva sigmoideal como la que se presenta en la Fig. 1.7 donde $(\Delta K_I)_n$ es el valor de umbral de ΔK_I , por debajo del cual una grieta no crece. Desde el umbral hasta la ruptura, una aleación de aluminio estará entre 85 y 90% de su vida en la región I, de 5 a 8% en la región II y entre 1 y 2% en la región III.

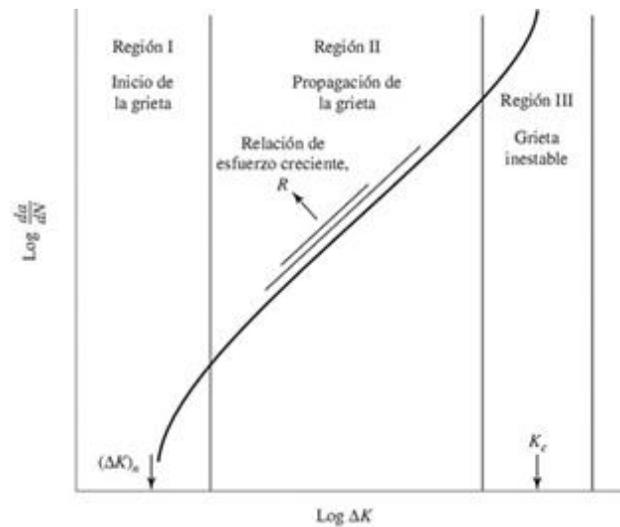


Fig. 1.7. Regiones según el crecimiento de la grieta.

1.2.2. ANÁLISIS DE FALLAS

Al considerarse una extensa cantidad de piezas metálicas que se fabrican y ponen en servicio, no es extraño que cierto número de elementos fallen prematuramente. En la producción de componentes en cantidades industriales debe esperarse cierta desviación en cuanto a fallos anticipados se refiere. A partir de estas desviaciones de resultados surge la importancia de analizar y conocer el origen de tales defectos [3].

En cualquier análisis de las causas que producen fallas es importante obtener tantos datos como sean posibles de la propia pieza que falló, además de examinar las condiciones en el momento en que se produjo la falla. Algunas preguntas que deben hacerse son [3]:

- i) ¿Cuánto tiempo estuvo la pieza en funcionamiento?
- ii) ¿Cuál era la naturaleza de los esfuerzos aplicados a la pieza en el momento en que se produjo la falla?
- iii) ¿Estuvo la pieza sometida a una sobrecarga?
- iv) ¿Se instaló adecuadamente la pieza?
- v) ¿Estuvo sometida a servicio excesivo?

- vi) ¿Hubo algunos cambios en el ambiente?
- vii) ¿Tuvo la pieza un mantenimiento adecuado?

Después de estudiar la superficie fracturada se deben contestar las preguntas siguientes:

- i) ¿Fue la fractura dúctil, frágil o una combinación de las dos?
- ii) ¿Empezó la falla en la superficie o por debajo de ella?
- iii) ¿Empezó la falla en un punto, o se originó en diversos puntos?
- iv) ¿Empezó la fisura recientemente o había estado creciendo por un tiempo largo?

Debe ser obvio que no puede prescribirse ninguna solución adecuada, a menos que se disponga de la información que considere la forma en que se comportó y falló la pieza [3].

Las pruebas de laboratorio y de campo permiten evaluar los efectos del material, el diseño y las variables de fabricación sobre el comportamiento de la pieza en condiciones controladas; por otro lado, el análisis de las causas que producen fallas se centra en los elementos devueltos del servicio y de este modo da resultados de condiciones reales de operación. Combinando la información de los ensayos con los resultados del análisis, se puede obtener un cuadro claro de las causas que producen la falla. Rara vez son fallas asignadas a una sola causa; generalmente resultan de los efectos combinados de dos o más factores que son perjudiciales para la vida de la pieza o estructura [3].

Cuando se estudia una falla, se debe tener especial cuidado en no destruir pruebas importantes. Los estudios detallados requieren generalmente un conocimiento previo de la historia del servicio (tiempo, temperatura, carga, ambiente, entre otros) junto con el análisis químico, fotomicrografías y semejantes. El estudio ulterior de la secuencia de acontecimientos que causaron la falla, más el conocimiento de la localización, marcas y condición de todos los elementos adyacentes en el momento de la falla, es necesario para confirmar el análisis. Siempre existe la posibilidad de aplicar cargas imprevistas, de colisiones no reportadas o de vibración no anticipada que pueden haber contribuido a fallas prematuras [3].

El procedimiento para investigar una falla consiste en:

- i) Observaciones iniciales.
- ii) Datos informativos.
- iii) Estudios de laboratorio.
- iv) Síntesis de la falla.

Los metales fallan de diversas maneras y por diferentes razones. La determinación de la causa de la falla es vital para prevenir una recurrencia. Una de las fuentes de información más importantes relacionadas con la causa de la falla es la superficie de fractura en sí misma.

Una superficie de fractura es un registro detallado del historial de fallas de la pieza. Contiene evidencia del historial de carga, efectos ambientales y calidad del material. La principal técnica utilizada para analizar esta evidencia es la Microscopía Electrónica de Barrido. Fundamental para la aplicación de esta técnica es una comprensión de cómo los metales se fracturan y cómo el ambiente afecta el proceso [6].

El análisis fractográfico es una herramienta para la detección de fallas en estructuras metálicas, ya que a pesar de los cuidados tomados durante las etapas de diseño, fabricación, instalación y operación de componentes estructurales metálicos, los mismos fallan. En muchas circunstancias, las fallas involucran procesos de fractura. Este análisis tiene como objetivo determinar las causas de la falla de un componente o estructura e involucra la implementación en forma coordinada de diferentes técnicas analíticas.

Se puede tomar como definición del concepto de análisis fractográfico a la técnica analítica que consiste en el análisis de las superficies de fractura a nivel macroscópico y microscópico. Tiene como objetivo analizar las características de la fractura e intentar relacionar la topografía de la superficie de la fractura con las causas y/o los mecanismos básicos de la fractura. Es decir, suministra valiosa información acerca de las causas de falla.

Es por esto que es bien visto realizar un estudio fractográfico a los especímenes sometidos a ensayos, sea de la naturaleza que sean, con el propósito de poder describir las características de la fractura [1].

1.2.3. CONDICIONES PARA EL INICIO DE FRACTURA POR FATIGA

Las cargas aplicadas de manera variable y repetida tienden a producir esfuerzos, mismos que originan fallos en los materiales que sufren este tipo de cargas, o sea en los materiales metálicos [1].

Además, existen situaciones en las cuales los esfuerzos máximos reales son mucho menores a la resistencia máxima a la tracción del material, siendo usualmente mucho menores que la resistencia de fluencia. Debido a estas clases de fallas es que los esfuerzos se han repetido de manera creciente. Estos esfuerzos ocurren a partir del resultado de la rotación, flexión o las vibraciones [1].

Para que se produzca una falla por fatiga deben estar presentes las siguientes condiciones [11].

- ✓ Un esfuerzo máximo de valor elevado.
- ✓ Una variación o fluctuación suficientemente intensa de los esfuerzos aplicados.
- ✓ Un extenso número de ciclos [11].

Existen variables que pueden incidir de manera prudencial o hasta exponencial en la fatiga. Dicho de otra manera, se tienen ciertos fenómenos que pueden producir la ruptura en las probetas o elementos de máquina. Dichas variables son por ejemplo la temperatura, la corrosión, los esfuerzos residuales, esfuerzos combinados y los concentradores de esfuerzo [11].

Se puede observar a lo largo de varios reportes de ensayos que en regiones libres de defectos o de buen acabado en la superficie de las probetas, empiezan a surgir grietas debido a mínimos concentradores de esfuerzos que son originados por deformaciones plásticas localizadas por deslizamiento de planos.

Luego, después de muchos ciclos repetidos, se desarrolla una pequeña grieta en las intersecciones de estas bandas de deformación ubicadas con la superficie de la probeta.

Los defectos internos tienden, al igual que las variables anteriormente descritas, a acortar el tiempo necesario para la iniciación de las grietas, siendo algunos defectos internos inclusiones metálicas y en otros casos, poros de gases atrapados en la aleación. Por lo anterior, se tiene que tener una consideración especial en cuanto al acabado superficial, teniendo el sumo cuidado de la importancia del mismo ya que, como se ha dicho, puede afectar en gran medida a los ensayos de fatiga por flexión rotativa, teniendo a la vez, incidencia en los resultados obtenidos, tal como se presenta en la Fig. 1.8 para observar cada etapa [11].

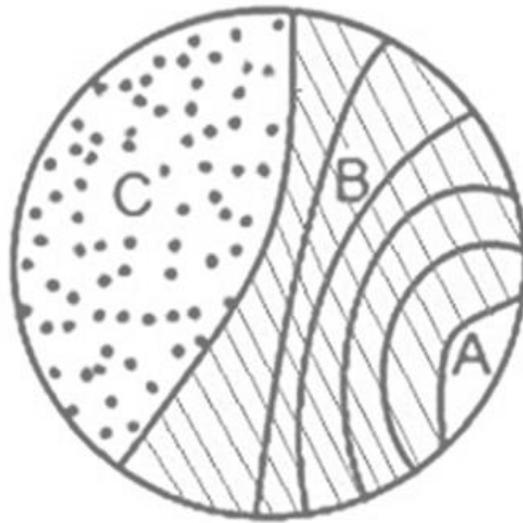


Fig. 1.8. Aspectos de las zonas de la superficie de fractura por fatiga: A es la iniciación de la grieta por fatiga, B es la propagación de la grieta por fatiga, y C es la zona de ruptura por sobrecarga.

1.2.4. TIPOS DE FRACTURA

Como se destacó, el análisis adecuado de la fractura suele dar mucha información sobre los factores de contribución y ayuda a identificar el tipo de falla.

Las fracturas dúctiles son el resultado de fuerzas cortantes que producen deformación plástica (deslizamiento o macla) a lo largo de ciertos planos

cristalográficos, en tanto que las fracturas frágiles se deben a fuerzas de tracción que producen clivaje. En la mayoría de las fracturas, ambos tipos están presentes en diversos grados. La identificación del mecanismo básico suele determinar el tipo de carga que inició la fractura. De la misma manera, el conocimiento de la aplicación de la carga ayuda a determinar si una falla particular fue de naturaleza dúctil (corte) o frágil (clivaje) [3].

Las fracturas por corte producidas por una carga única son de color gris opacas y fibrosas, con bordes que por lo general están deformados plásticamente. Unas pequeñas cavidades se forman inicialmente por deslizamiento. Se unen de manera conjunta y crecen eventualmente para formar una fisura bajo una aplicación continuada de cargas. La fisura se extiende con ayuda de la concentración de esfuerzos en la punta de la fisura, moviéndose por lo general en forma perpendicular a la fuerza de tracción y formando eventualmente un “labio de corte” en la superficie como se aprecia en la Fig. 1.9 [3].

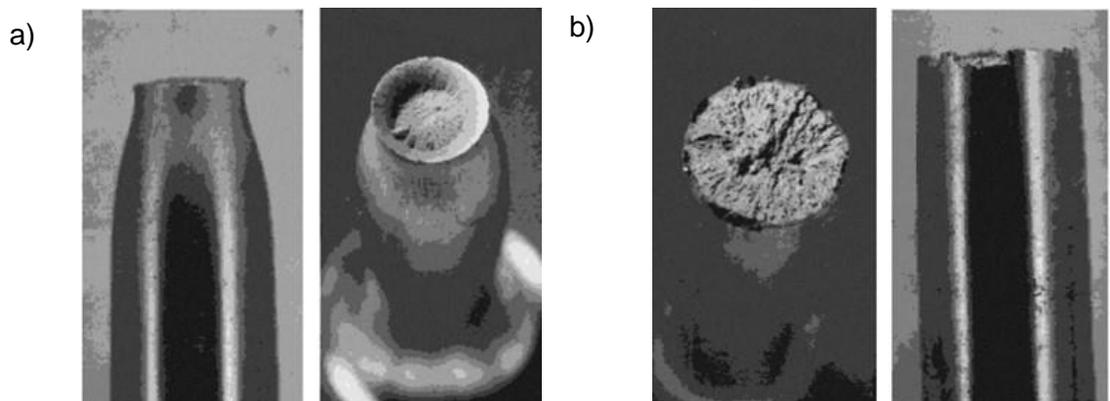


Fig. 1.9. Fracturas: a) Dúctil copa y cono en un acero al bajo carbono; y b) Frágil en un acero al alto carbono.

Las fracturas frágiles (clivaje) aparecen brillantes y cristalinas. Cada cristal tiende a fracturarse en un plano de clivaje único, plano que varía sólo ligeramente de un cristal al siguiente. Por esta razón, se concluye que una fractura por clivaje en una probeta policristalina generalmente brillará en la luz cuando se gira en la mano. Las superficies de fracturas frágiles algunas veces tienen apariencias

distintivas. Desde el origen de la fractura se forma un modelo característico de Chevron o espigado, el cual apunta al origen de la fractura tal como se presenta en la Fig. 1.10. Dado que el deslizamiento y el clivaje se presentan en un diferente conjunto de planos cristalográficos, la naturaleza de las fracturas individuales puede determinarse por medio de un examen metalográfico en el laboratorio [3].

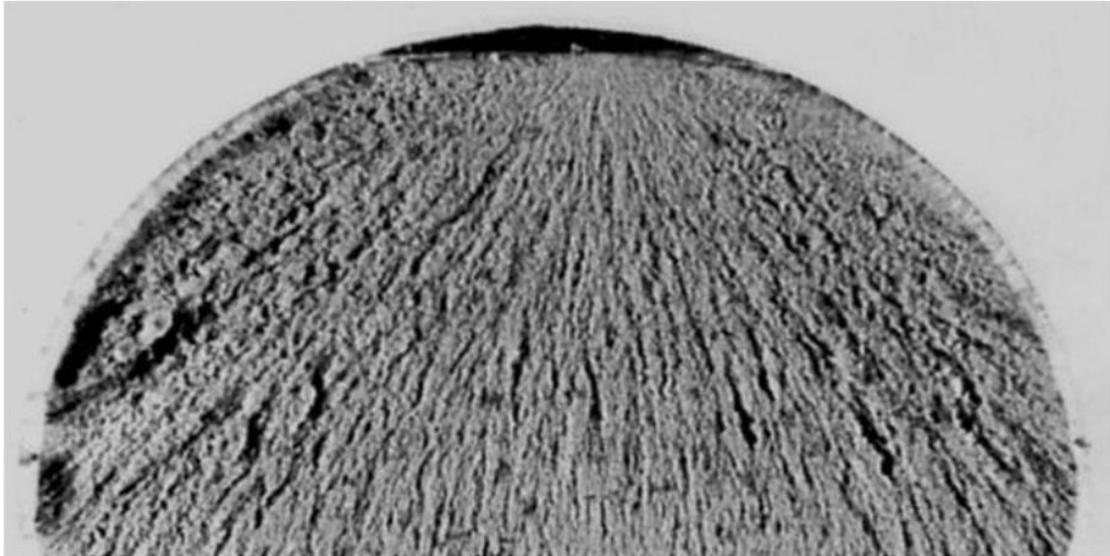


Fig. 1.10. El modelo tipo Chevron apunta hacia el origen de la fractura frágil en esta superficie de fractura.

Las fracturas rara vez son de clivaje o de corte. Los esfuerzos variables que generalmente existen en una estructura, el cambio de modelos de esfuerzo durante el avance de la grieta, o las diferencias microscópicas en orientación de granos, producen fracturas compuestas tanto de áreas de corte como de clivaje. La consideración de combinaciones de modos de fractura puede dar información respecto a la naturaleza de la fractura. En la Fig. 1.11 se presentan tres muestras del mismo material conforme reaccionaron a pruebas de cargas aplicadas con impacto en especímenes muescados a diferentes temperaturas [3]. En la muestra Fig. 1.11a la superficie de fractura es principalmente gris opaco y fibroso; los bordes están curvados, indicando deformación plástica, de manera que el modo de fractura es principalmente de corte. En la muestra Fig. 1.11b el modo fue de corte y clivaje mezclados, ya que la superficie es brillante y opaca con alguna

evidencia de deformación plástica en los bordes. La fractura de la Fig. 1.11c es sólo por clivaje. La superficie entera es brillante y los bordes rectos, no presenta evidencias de deformación plástica [3].

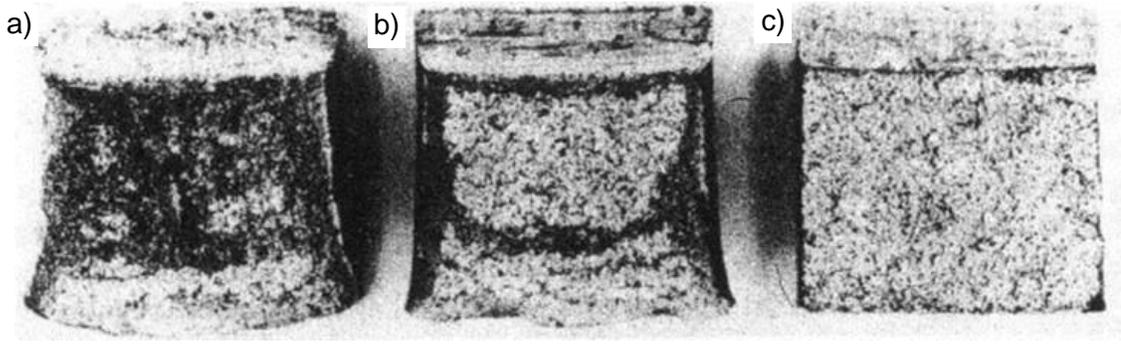


Fig. 1.11. Combinaciones de modos de fractura se observan en superficies de fractura de tres probetas ensayadas con cargas aplicadas con impacto, las cuales fueron fracturadas a diferentes temperaturas: a) La fractura es casi en su totalidad de corte; b) La fractura es de corte y clivaje combinados; y c) De clivaje.

1.3. DIAGRAMA DE FATIGA (ESFUERZO VS NÚMERO DE CICLOS A LA FRACTURA)

La resistencia a la fatiga de un material es su capacidad de resistir a cargas de fatiga. En general es el valor del esfuerzo que puede resistir un material durante una cantidad de ciclos de carga. Si la cantidad de ciclos es infinita, el valor se llama límite de fatiga [9].

Las resistencias a la fatiga se suelen graficar en el diagrama S-N o *diagrama esfuerzo-ciclos*. La Fig. 1.12 presenta un diagrama S-N [9].

Para determinar la resistencia de materiales bajo la acción de cargas de fatiga, las probetas se someten a fuerzas repetidas o variables de magnitudes especificadas, mientras se cuentan los ciclos o inversiones del esfuerzo hasta su destrucción. Para establecer la resistencia a la fatiga de un material, se necesita un número muy grande de ensayos debido a la naturaleza estadística de la fatiga. En el caso del ensayo con viga rotativa, se aplica una carga constante de flexión y se registra el número de revoluciones (inversiones del esfuerzo) de la viga hasta

que se presente la falla. El primer ensayo se hace con un esfuerzo que es un poco menor que la resistencia última del material. El segundo ensayo se realiza a un esfuerzo que es menor que el primero. Este proceso se continúa y los resultados se grafican como un diagrama $S-N$ (ver, Fig. 1.12). La gráfica se hace en papel semilogarítmico o en papel log-log. En el caso de metales ferrosos y aleaciones, la gráfica se hace horizontal después de que el material se somete a esfuerzo durante un cierto número de ciclos. Al graficar en papel logarítmico, se acentúa la curvatura en la línea, la cual quizá no sea visible si los resultados se grafican en coordenadas cartesianas [7].

La ordenada del diagrama $S-N$ se llama resistencia a la fatiga S_f , cuyo enunciado siempre se debe acompañar por su número de ciclos correspondiente N . Las curvas resultantes en los diagramas $S-N$ se destinan a la toma de decisiones para elección de materiales que se deben utilizar en aplicaciones específicas, ya que de estas curvas según las normas técnicas y teniendo la confiabilidad de los datos, justifican los resultados ya sea para exploración, investigación, diseño o desarrollo. Las probetas ensayadas y los elementos mecánicos tienen diferencias significativas entre las curvas resultantes de los diagramas respectivos.

En el caso de los aceros, se presenta un cambio brusco de dirección en la gráfica, y más allá de este cambio no ocurrirá la falla, sin importar qué tan grande es el número de ciclos [7].

1.3.1. ZONAS EN EL DIAGRAMA DE FATIGA

En estos diagramas se pueden ubicar tres zonas distintivas, que se pueden identificar con los siguientes tres regímenes de fatiga, estas son [10]:

- a) Régimen de fatiga de bajo ciclaje de vida finita,
- b) Régimen de fatiga de alto ciclaje de vida finita, y
- c) Régimen de fatiga de alto ciclaje vida Infinita.

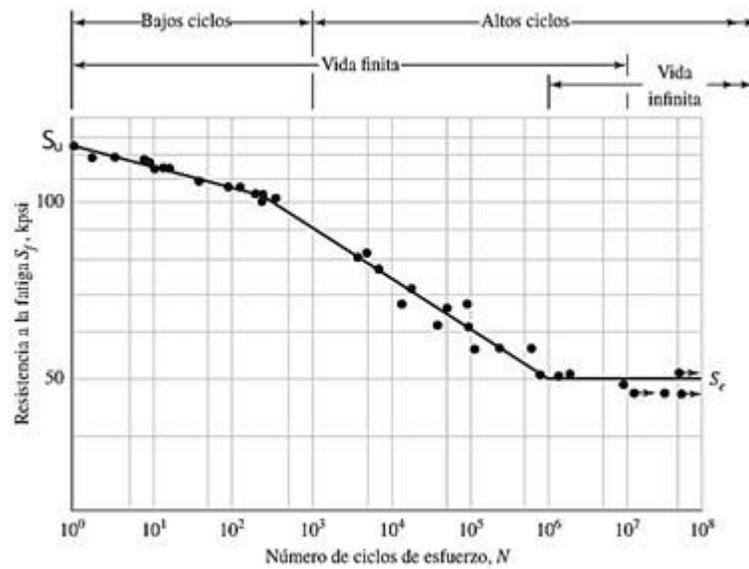


Fig. 1.12. Regiones en que se divide el diagrama S-N [7].

La resistencia correspondiente al cambio en la gráfica se llama límite de resistencia S_e o límite de fatiga. La gráfica de la Fig. 1.12 nunca se hace horizontal en el caso de metales y sus aleaciones no ferrosas; de aquí que estos materiales no tengan un límite de fatiga. En la Fig. 1.13 se presenta las bandas que indican las curvas S-N de las aleaciones de aluminio más comunes, excluyendo las aleaciones forjadas que tienen una resistencia a la tracción por debajo de 38 ksi (262 MPa). Como el aluminio no tiene un límite de resistencia, normalmente la resistencia a la fatiga S_f se presenta a un número específico de ciclos, por lo general N igual a 5×10^8 ciclos de esfuerzo invertido [7].

Se observa que durante un ciclo de esfuerzo ($N = 1$) se produce una aplicación y retiro de la carga, luego en sentido contrario otra aplicación y retiro de la carga. De esta manera, para $N = 1/2$ significa que la carga se aplica una vez y luego se retira, que es el caso del ensayo a tracción simple [7].

El conjunto de conocimientos disponibles sobre la falla a la fatiga, desde $N = 1$ hasta $N = 1000$ ciclos, por lo general se clasifica como fatiga de bajos ciclos, como se indica en la Fig. 1.12. En consecuencia, la fatiga de altos ciclos se relaciona con la falla correspondiente a ciclos de esfuerzos mayores que 10^3 ciclos [7].

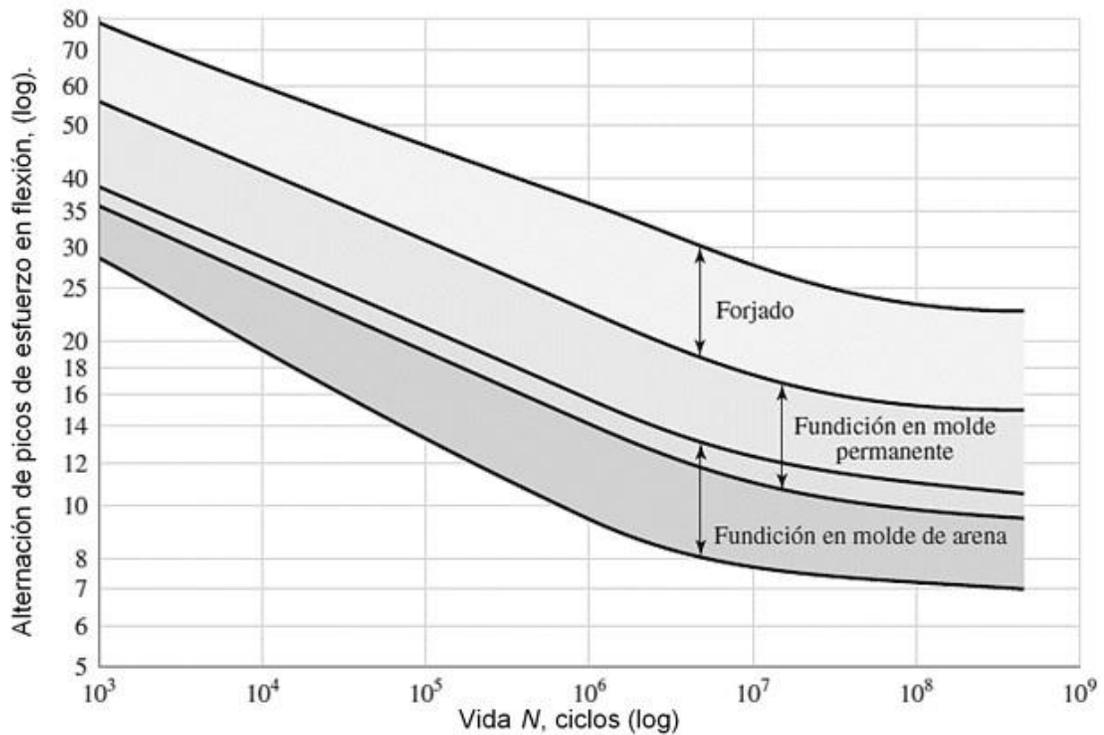


Fig. 1.13. Bandas S-N de aleaciones representativas de aluminio, excluyendo las aleaciones forjadas.

En la Fig. 1.12 también se hace una distinción entre región de vida finita y región de vida infinita. La frontera entre las regiones no se puede definir con claridad excepto para un material específico, pero se ubica en algún punto entre 10^6 y 10^7 ciclos en el caso de los aceros, como se presenta en la Fig. 1.12 [7]. Como se hizo notar antes, siempre es una buena práctica de ingeniería realizar un programa de ensayos sobre los materiales que se van a emplear en el diseño y manufactura. Esto, de hecho, es un requisito, no una opción, para evitar la posibilidad de una falla por fatiga [7].

Debido a esta necesidad de ensayos, realmente sería innecesario proceder más adelante en el estudio de la falla por fatiga, excepto por una razón importante: el deseo de conocer por qué ocurren las fallas por fatiga de manera que se pueda utilizar el método o los métodos más eficaces para mejorar la resistencia a la fatiga. De esta manera, el propósito principal cuando se estudia la fatiga es entender por qué ocurren las fallas, de tal manera que se puedan evitar de manera óptima. Por esta razón, los métodos analíticos de diseño que

se presentan, no producen resultados precisos. Los resultados deben tomarse como una guía, como algo que indica lo que es importante y lo que no lo es cuando se diseña para evitar la falla por fatiga. Como se estableció anteriormente, el método del esfuerzo-vida es el enfoque menos exacto, especialmente en el caso de las aplicaciones de bajos ciclos. Sin embargo, es el método más tradicional, con una gran cantidad de datos publicados. Es el más fácil de implementar para un amplio intervalo de aplicaciones de diseño y representa las aplicaciones de altos ciclos de manera adecuada. Sin embargo, debe tenerse cuidado cuando se le utilice en aplicaciones de bajos ciclos puesto que el método no es válido para el comportamiento de esfuerzo-deformación verdadero o real cuando ocurre fluencia localizada [7].

1.3.2. ESFUERZOS FLUCTUANTES

Cuando un elemento de máquina está sometido a un esfuerzo alternante con promedio distinto de cero, la carga produce un esfuerzo fluctuante. Como se presenta en la Fig. 1.5e y 1.5f se presentan dos curvas de esfuerzos en función del tiempo. Todo esfuerzo variable con promedio distinto de cero se considera esfuerzo fluctuante [9].

Un elemento donde la carga se aplica cíclicamente desde un determinado valor y posteriormente se lleva al valor de carga cero, sin que el elemento rote, desarrollará esfuerzos fluctuantes ya que las zonas de esfuerzo siempre experimentarán un sólo comportamiento de esfuerzo (tracción o compresión) y en un elemento sometido a carga cíclica aunado a rotación se desarrollarán esfuerzos invertidos o alternantes ya que las zonas sometidas a esfuerzos alternarán en su comportamiento (tracción y compresión) [9].

Un caso especial del esfuerzo fluctuante, que se encuentra con frecuencia, es el esfuerzo repetido en una dirección, cuando la carga se aplica y se remueve varias veces. Como se observa en la Fig. 1.5e el esfuerzo varía desde cero hasta un máximo en cada ciclo. Entonces, por observación, el esfuerzo mínimo σ_{\min} es

cero, el esfuerzo medio σ_m es igual al esfuerzo máximo $\sigma_{m\acute{a}x}$ dividido entre 2, siendo la relación de esfuerzos R, (esfuerzo mínimo dividido entre esfuerzo máximo) igual a cero [9].

1.4. ANÁLISIS METALGRÁFICO

Con el objetivo de verificar la legitimidad de que el acero para la fabricación de las probetas, se encuentra dentro del intervalo permisible para la composición química se debe llevar a cabo un estudio de la metalografía [13].

A continuación, presentamos de manera resumida un estudio metalográfico realizado a un acero AISI 1020, donde se analiza la microestructura e inclusiones que puede presentar la probeta [13].

En la realización de este análisis se comparan imágenes obtenidas contra imágenes que aparecen en libros de materiales [13].

El laboratorio se realizó con los siguientes químicos para ataques mostrados en la Tabla 1.1 [13].

En las Figs. 1.14 y 1.15 se presentan el material en estado de entrega, el cual se llevó a la prueba metalográfica sin ser atacado para comprobar que las manchas negras mostradas en las imágenes tomadas en las probetas atacadas y observadas metalográficamente son producto de defectos de fabricación; se pueden observar manchas oscuras, algunas por partículas de abrasivo o alúmina que generan las llamadas “colas de cometa”, además, poros o incrustaciones generados luego del proceso de colado del acero AISI 1020 [13].

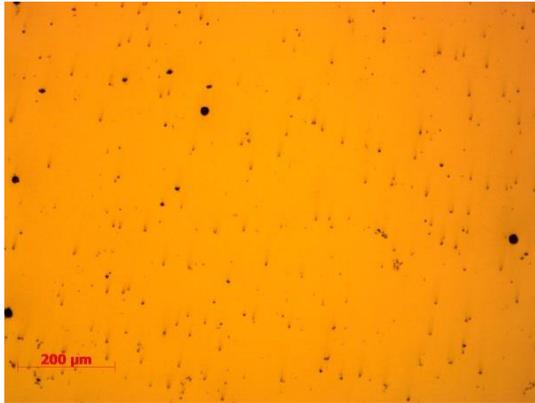


Fig. 1.14. Micrografía del acero AISI 1020 en estado de entrega, sin atacar (100x).

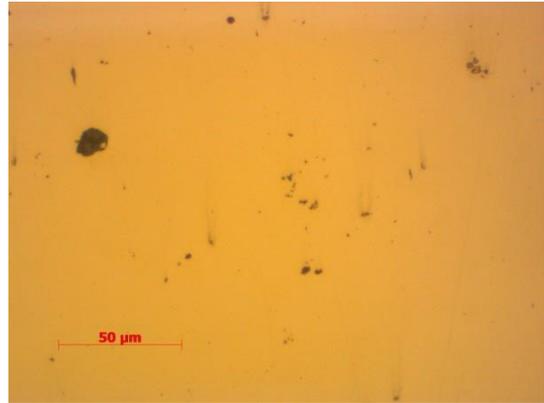


Fig. 1.15. Micrografía del acero AISI 1020 en estado de entrega, sin atacar (1000x).

En las Figs. 1.16 y 1.17 se observan la micrografía del material en estado de entrega (sin tratamiento térmico), y se encuentran manchas oscuras y claras donde corresponde a una composición de perlita y ferrita respectivamente.

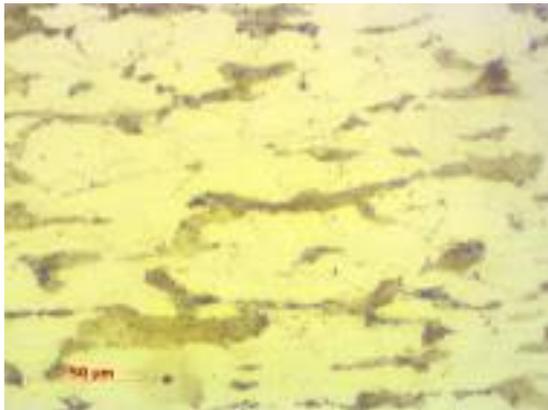


Fig. 1.16. Micrografía del acero AISI 1020 en estado de entrega, atacado (500x).

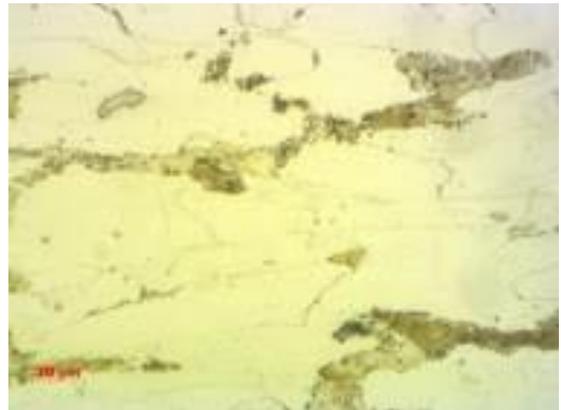


Fig. 1.17. Micrografía del acero AISI 1020 en estado de entrega, atacado (1000x).

Tabla 1.1. Reactivos para ataque químico para examen microscópico.

Reactivo de ataque	Composición	Usos
Ácido Nítrico	Ácido Nítrico 5 cc Alcohol etílico 95 cc	Acero y hierro
Ácido Pícrico	Ácido Pícrico 4 g Alcohol etílico 100 ml	Aceros de baja aleación
Cloruro férrico y ácido hidroclicóric	Cloruro férrico 5 g Ácido hidroclicóric 50 ml Agua 100 ml	Aceros austeníticos al níquel y aceros inoxidables
Persulfato de amonio	Persulfato de amonio 10 g	Cobre, Latón, Bronce, Aluminio, Níquel, Plata
Ácido hidroflicóric	Ácido hidroflicóric 0.5 ml Agua 99.5 ml	Aluminio y sus aleaciones

A continuación, se presenta una serie de imágenes obtenidas de un microscopio digital, obteniendo resultados después del ataque químico. La Fig. 1.18 presenta, a diferentes aumentos, la metalografía de una probeta AISI 1020 atacada químicamente [13].

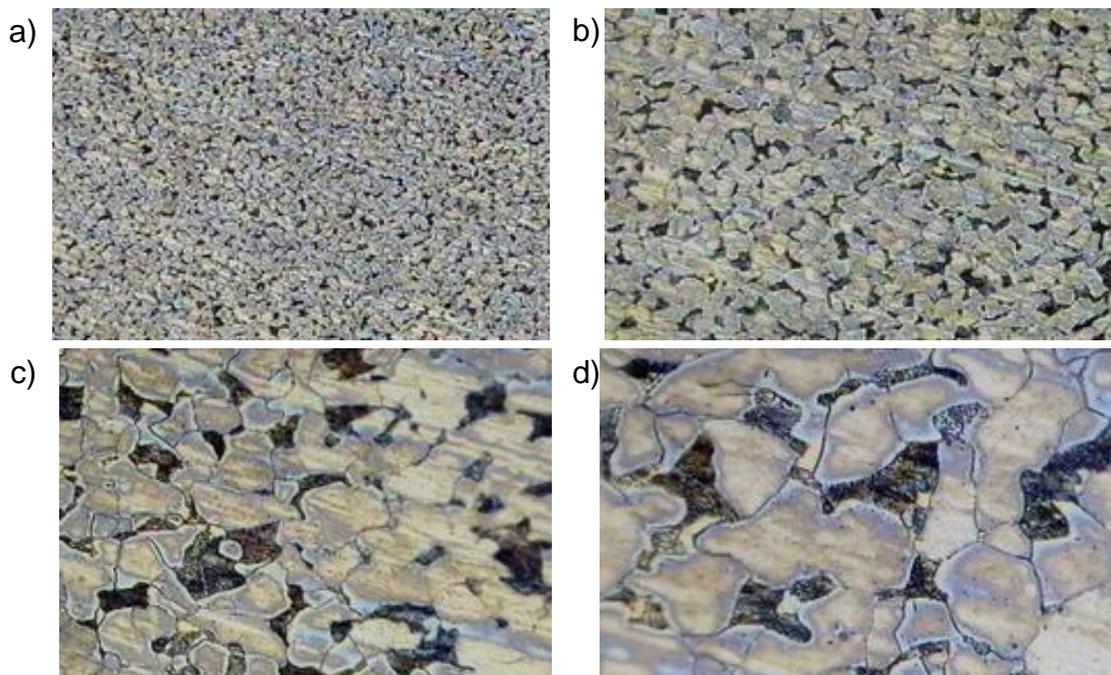


Fig. 1.18. Metalografía de una probeta AISI 1020 atacada químicamente: a) 100x; b) 200x; c) 500x; y d) 1000x.

Los resultados de la composición del material obtenidos se presentan en la Tabla 1.2 [13].

Tabla 1.2. Resultado final del ataque químico al acero AISI 1020.

Material	Porcentaje, %	
% Ferrita proeutectoide	76.18	
% Perlita	23.82	
% Ferrita en la Perlita	97.15	23.14
% Cementita en la Perlita	2.85	0.68

En la Fig. 1.19 se presenta el diagrama Hierro Carbono el cual se utiliza para hacer un análisis de la microestructura del acero AISI 1020 [13].

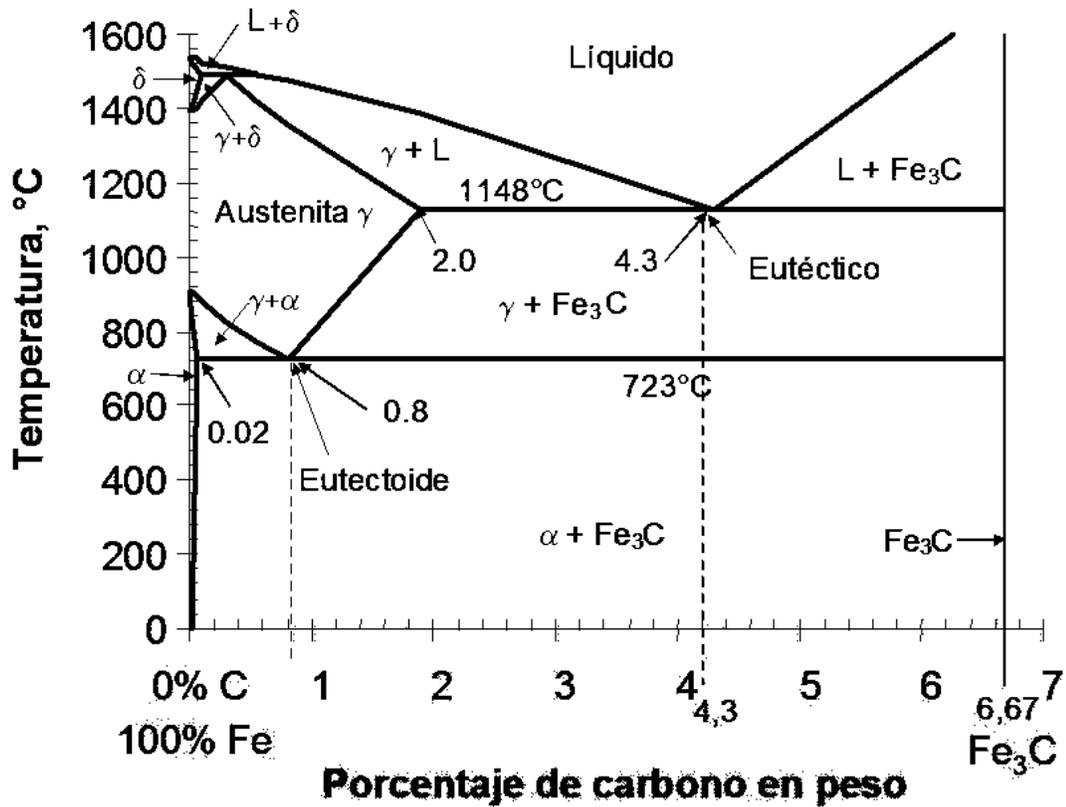


Fig. 1.19. Diagrama Hierro Carbono.

Al iniciar el análisis del diagrama se observa que se forma ferrita proeutectoide y esta, después de la línea crítica de temperatura de transformación ya no sufre transformación. Por lo tanto, la ferrita eutectoide

generada pasa a ser perlita, es decir ferrita y cementita. Tales porcentajes de ferrita y cementita son los mostrados en la Tabla 1.2 [13].

En el porcentaje de ferrita en la perlita, el 97.15% quiere decir que está formada mayormente por ferrita ya que la cementita ocupa solamente el 2.85% de la perlita. Pero el porcentaje de ferrita en la perlita de toda la solución se presenta como el 23.14% y para la cementita en la perlita es el 0.68% en toda la solución [13].

En este capítulo se recopiló información de diferentes fuentes bibliográficas sobre la fatiga y en específico, la fatiga al aire por flexión rotativa, los diferentes tipos de esfuerzos que se producen por las cargas aplicadas en fatiga, tipos de fractura y análisis metalográfico para un acero AISI 1020 recocido; con respecto al siguiente capítulo, se introduce al diseño experimental, el cual presenta el estudio del comportamiento a la fatiga al aire para los 3 diferentes radios de acuerdo seleccionados.

Se pretende estudiar el efecto de los diferentes radios de acuerdo entre las secciones de sujeción y de ensayo de las probetas sometidas a esfuerzos por fatiga, utilizando un acero AISI 1020 como material de ensayo.

En la actualidad no se han desarrollado estudios significativos que demuestren la influencia de los radios de acuerdo en los elementos sometidos a esfuerzos de fatiga por flexión rotativa.

La información recopilada en la literatura se encuentra escuetamente y solamente de manera teórica y sin desarrollo experimental por lo que en este trabajo se procede a la recopilación de dicha información y posteriormente al desarrollo de los ensayos para verificación de resultados y el análisis de los mismos.

2. DISEÑO EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta el procedimiento para la elaboración de las probetas con los tres diferentes radios de acuerdo propuestos en este estudio, los cuales son de 8, 16 y 40 mm después de pasar por un tratamiento térmico de recocido de alivio de esfuerzos residuales post maquinado de las probetas. También, se describe el lijado y pulido de las probetas. Finalmente se presenta información acerca del uso de la máquina de fatiga por flexión rotativa en donde se realizarán los ensayos y el proceso a seguir para la obtención de los resultados de las probetas ensayadas.

2.1. FLUJOGRAMA DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Para tener un mejor panorama de las etapas que se deben completar durante el diseño experimental es necesario representar de forma ordenada los pasos a desarrollar, haciendo uso de un flujograma del diseño experimental (ver, Fig. 2.1).

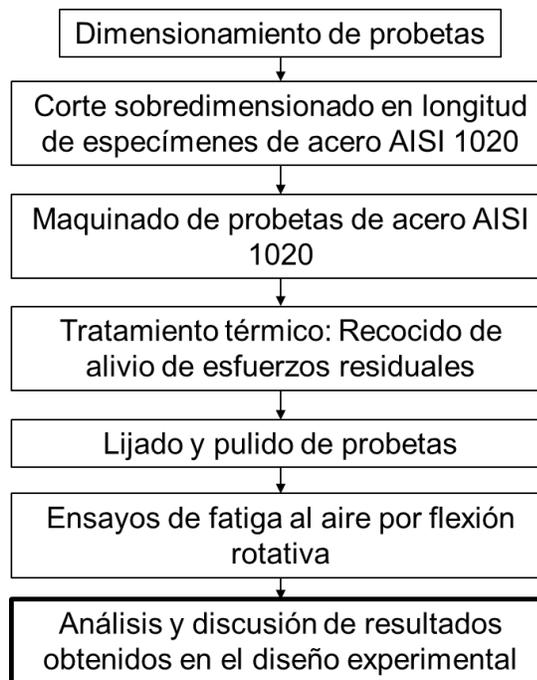


Fig. 2.1. Flujograma del diseño experimental.

2.2. DIMENSIONAMIENTO DE LAS PROBETAS

La mayoría de las investigaciones de fatiga se realizan en máquinas de fatiga a flexión rotativa en parte, debido a que estas máquinas son seguras, baratas y requieren poca atención, pero también, porque el tipo de esfuerzo es igual al que se aplica a un gran número de componentes en las condiciones de servicio. Además, se tienen dos limitaciones importantes para este método de ensayo; primero, está virtualmente limitado a probetas cilíndricas, y segundo, que la probeta puede estar sometida solamente a esfuerzos alternantes.

Las máquinas de flexión rotativa se han utilizado desde el tiempo en que Wöhler construyó la primera para investigar los fallos por fatiga en los ejes de ferrocarril. Desde entonces se han proyectado y construido muchas máquinas para probetas entre 1.27 a 24.13 mm (0.05 a 0.95 pulgadas) de diámetro. De estas mismas se identifican tres tipos principales de máquinas, los cuales son: Máquina con soporte simple.

Máquina con soporte de dos puntos.

Máquina con soporte en viga (viga simplemente apoyada).

Las máquinas de las cuales se pudo adquirir información son de los tipos de soporte simple (viga en voladizo) Fig. 2.2 y del tipo soporte en viga (viga apoyada en dos puntos) Fig. 2.3. El dimensionamiento de las probetas depende del tipo de máquina que se utilice para realizar los ensayos de fatiga por flexión rotativa.



Fig. 2.2. Máquina de fatiga por flexión rotativa con soporte simple.

La máquina utilizada en el presente trabajo es del tipo de máquina de fatiga por flexión rotativa, como la de la Fig. 2.2, GUNT modelo WP140. En esta máquina, la probeta por uno de sus extremos es solidaria a un mandril (acoplado al motor que hace rotar la probeta) que la fija firmemente y por el otro extremo se hace encajar a un rodamiento del sistema que aplica la carga a la probeta.

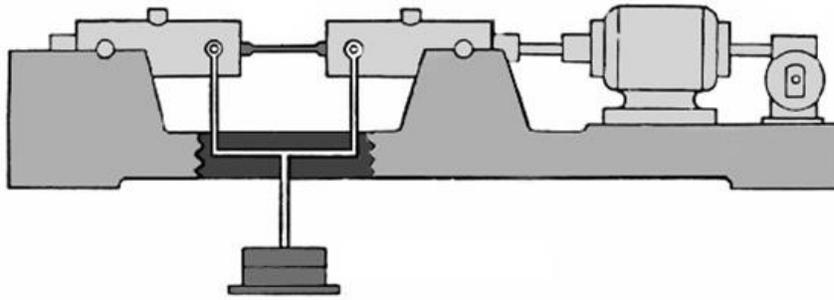


Fig. 2.3. Esquema de una máquina de fatiga por flexión rotativa con soporte en viga (viga simplemente apoyada).

En la máquina con soporte en viga, la probeta se sujeta en sus dos extremos con mandriles, la aplicación de la carga se hace por medio de los apoyos en los que encaja, uno de esos rodamientos está acoplado al eje del motor el cual dota a la probeta de rotación.

La máquina de fatiga con soporte en viga, emplea probetas simétricas cuya geometría y dimensiones son estandarizadas por la norma de la ASTM designación E 466, como se presenta en la Fig. 2.4.

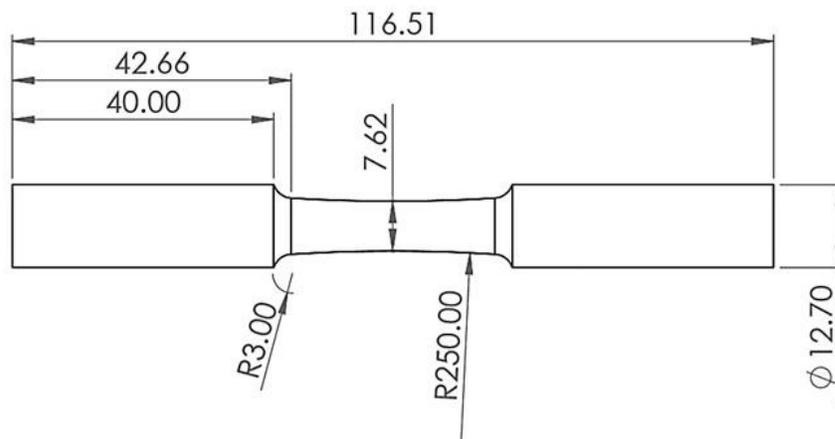


Fig. 2.4. Geometría de probeta para máquina con soporte en viga, según la norma de la ASTM designación E 466, cotas en mm.

Para este tipo de máquina se proporcionan fórmulas para el cálculo de la resistencia a la fatiga. En la Fig. 2.5 se plantea un análisis de fuerzas para la obtención de la ecuación que exprese la resistencia a la fatiga y los factores que intervienen en ella.

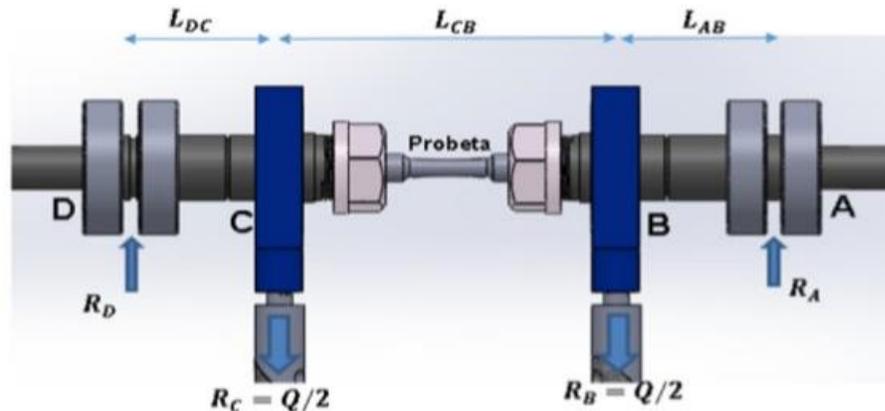


Fig. 2.5. Esquema de diseño de máquina para ensayo de fatiga, se puede observar la longitud (L_{DC}) que se utiliza en el cálculo de la resistencia a la fatiga.

La Ec. 2.1, expresa la resistencia a la fatiga, para esta máquina en específico.

$$S_f = \frac{16 * L_{DC} * Q}{\pi(d^3)} \quad (2.1)$$

Se utilizaron los procedimientos establecidos en el manual de la máquina para ensayos de fatiga por flexión rotativa, GUNT modelo WP140, para poder trabajar con el equipo de ensayos. Las probetas tienen la configuración geométrica según la Fig. 2.6.

De acuerdo con las tolerancias dimensionales proporcionadas por el fabricante de la máquina para ensayos de fatiga por flexión rotativa, las dimensiones de las probetas deben encontrarse en el intervalo especificado en la Tabla 2.1. La longitud con diámetro menor presenta una variación dependiente del radio de acuerdo que posee la probeta según la Tabla 2.2.

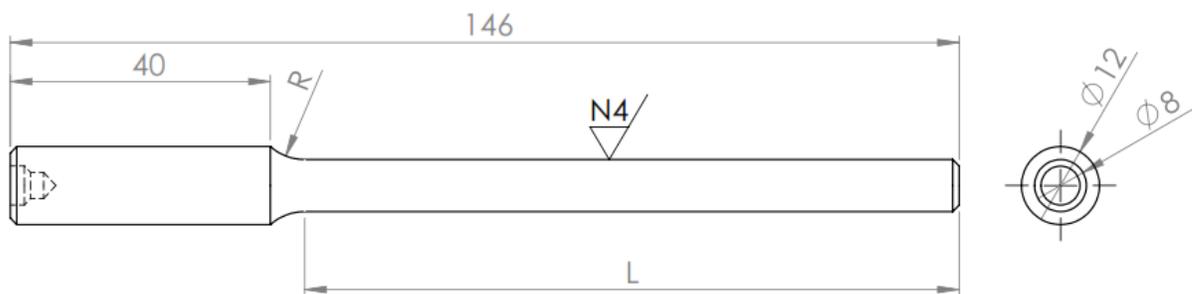


Fig. 2.6. Dimensiones de probetas con diferentes radios de acuerdo donde R es la magnitud del radio de acuerdo, L es la longitud de la sección menor; las demás dimensiones permanecen constantes para los diferentes radios de acuerdo.

Tabla 2.1. Tolerancias y/o ajustes especificados para probetas.

Sección de probeta, mm	Designación	Tolerancia bilateral, mm
Ø12	h9	0.000 -0.043
Ø8	f7	-0.016 -0.034

Tabla 2.2. Variación de longitud de la sección menor con respecto al radio de acuerdo.

R, mm	L, mm
8	100.71
16	97.25
24	96.41
32	94.86
40	93.51

Según el Manual de la Máquina para Ensayo de Fatiga por Flexión Rotativa WP140, se considera L como una constante cuyo valor es de 100.5 mm.

2.3. MAQUINADO DE LAS PROBETAS

Según datos proporcionados por la empresa Abastecedora Industrial. S.A. de C.V. (ABASTEINSA de C.V) el acero AISI 1020 en barra cilíndrica de 12.7 mm (½ pulgada) en estado de recocido, presenta la siguiente composición química, tal como se presenta en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Composición química del acero AISI 1020 según hoja técnica proporcionada por ABASTEINSA de C.V.

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Fe
% en peso	0.18-0.22	0.60	0.20	0.22	0.11	Balance

Las probetas se maquinaron en un torno CNC marca ALECOP modelo Expert, propiedad de la Universidad de El Salvador, tal como se presenta en la Fig. 2.7.



Fig. 2.7. Torno CNC marca ALECOP, modelo Expert.

2.3.1. PROCESO DE MAQUINADO DE LAS PROBETAS PARA LOS ENSAYOS DE FATIGA

Para la elaboración de las probetas se cortaron las 6 barras obtenidas en ABASTEINSA de C.V, de acero AISI 1020 en barra cilíndrica de 12.7 mm (½ pulgada) con longitud inicial de 6 metros, de las cuales se procedieron a cortar

especímenes con sierra manual a una longitud de 164 mm; posteriormente cada espécimen se refrentó a ambos lados, hasta una longitud de 160 mm y luego se perforaron utilizando broca de centrar con el objetivo de poder acoplarlas en el centro punto y seguir con la realización de las operaciones posteriores. Se realizó el primer cilindrado de la sección de agarre de la probeta, el cual fue terminado hasta llegar al diámetro de 12 mm, seguidamente se maquinó la sección de ensayo de las probetas a los diferentes radios de acuerdo (ver, Tabla 2.2).

El siguiente paso fue un corte, con sierra manual, sobre la longitud de 12 mm para lograr las dimensiones finales de la sección mayor hasta una longitud de 40 mm y de la sección menor, dependiendo del radio de acuerdo (ver, Tabla 2.2).

Por último, se realizó un refrentado en ambos extremos de las barras para dar la longitud final requerida por el manual de la máquina para ensayos de fatiga por flexión rotativa que es de 146 mm.

Para la obtención de las probetas se siguieron los procesos que se describen en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Pasos para la fabricación de probetas para ensayos de fatiga en un torno CNC ALEXOP, modelo EXPERT.

Condición de entrega: Barras de 6 m longitud, y diámetro 12.7 mm (½ pulgada).		
1	Corte barras	Manual hasta longitud 160 mm
2	Refrentado	Torno, ambas caras de barra
3	Perforación centro punto	Torno, ambas caras de barra
4	Cilindrado	Torno, sección de agarre cuyo \varnothing 12 mm
5	Cilindrado	Torno, sección a ensayar cuyo \varnothing 8 mm
6	Radio de acuerdo	Torno, radio deseado
7	Corte/tronzado	Eliminar centros puntos
8	Refrentado y biselado	Se refrento ambas caras de probeta para otorgar dimensiones finales, biselado ambas caras 1 mm X 45°

2.4. RECOCIDO DE LAS PROBETAS DE ACERO AISI 1020

El tratamiento térmico aplicado a las probetas de acero AISI 1020 fue un recocido de alivio de los esfuerzos residuales realizado posterior al maquinado de las probetas.

Las consideraciones a tomar en cuenta para la temperatura de recocido son el porcentaje de carbono de las probetas maquinadas, ya que éste es el componente que influye en la decisión de la temperatura elegida; y también se consideró la geometría de la probeta, ya que ésta influye en el tiempo de recocido. El proceso de recocido se esquematiza en la Fig. 2.8, a una velocidad

de calentamiento de 200 °C/h hasta alcanzar una temperatura de 650 °C con un tiempo de permanencia de 30 min por lote y enfriamiento en el horno [6].

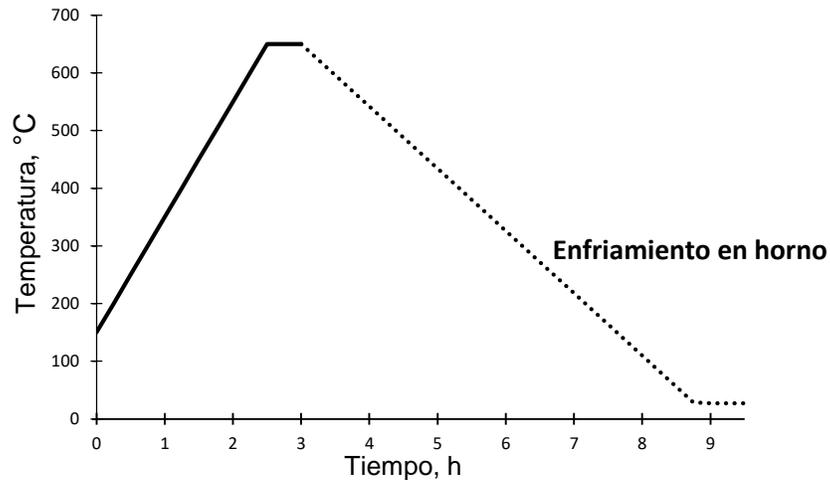


Fig. 2.8. Esquema del tratamiento térmico de recocido para alivio de esfuerzos residuales de un acero AISI 1020.

Para el proceso del tratamiento térmico fue necesario utilizar el equipo de protección adecuado tales como las mangas de cuero, delantal de cuero, guantes de cuero y careta para protección total de la cara. Para la colocación de los lotes de probetas al horno se utilizaron pinzas y una bandeja metálica (ver, Figs. 2.9 2.10).



Fig. 2.9. Equipo de protección para el proceso de tratamiento térmico recocido.



Fig. 2.10. Colocación del lote de probetas en la cámara del horno para el tratamiento de recocido.

2.5. LIJADO Y PULIDO DE LAS PROBETAS

La vida útil de los elementos sometidos a fatiga por flexión rotativa se ve afectada grandemente por la existencia de entallas ya que estas aumentan el esfuerzo local; es decir, muchas entallas y un pequeño radio de acuerdo reducen significativamente la vida útil del elemento.

Dos elementos con el mismo radio de acuerdo y con diferente calidad de superficie, una rugosa y la otra pulida, presentan diferencia con la vida útil, la cual es más prolongada en el elemento que tiene una superficie pulida.

El proceso de pulido de los elementos se realizó utilizando lijas de SiC desde la número 80 hasta la número 100, haciendo un lijado más basto para eliminar imperfecciones sobresalientes del material generado por el maquinado y después del tratamiento térmico de recocido tal y como se presenta en la Fig. 2.11.



Fig. 2.11. Probetas de Acero AISI 1020 maquinadas y recocidas.

Luego se utilizaron las lijas de SiC desde la número 100 hasta 400 para brindar a las probetas una superficie uniforme en cuanto a la rugosidad se refiere (ver, Fig. 2.12).

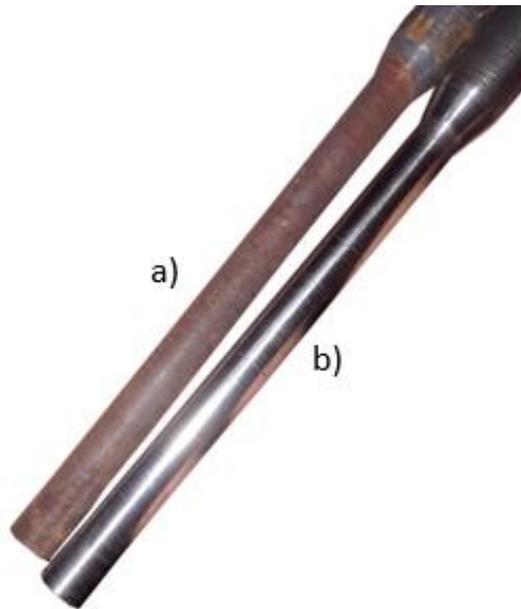


Fig. 2.12. a) Probeta maquinada y tratada térmicamente con recocido. b) Probeta lijada hasta lija 400.

Por último, se utilizaron lijas de SiC desde el número 400 hasta 1200 para el pulido, dejando una superficie lisa y sin entalla; posteriormente, las probetas se depositaron en recipientes llenos de aceite mineral con el objetivo de evitar la corrosión debido al ambiente húmedo y sin control (ver, Fig. 2.13).



Fig. 2.13. Probetas pulidas y depositadas en recipientes con aceite mineral para evitar corrosión.

2.6. ENSAYO DE FATIGA POR FLEXIÓN ROTATIVA

El comportamiento a la fatiga al aire se describe por medio de la ecuación de Basquin (Resistencia a la fatiga) y el valor de límite de fatiga [14].

Los ensayos de fatiga se realizaron en la máquina marca GUNT modelo WP 140, con un motor de frecuencia de 60 Hz (3,250 revoluciones por minuto) ubicada en el laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de la preparación adecuada de las probetas, como se ha descrito en este capítulo del diseño experimental.

La máquina de fatiga por flexión rotativa impone a una probeta un movimiento giratorio, la cual es sujeta en un extremo y en el otro se aplica una carga constante por medio del dispositivo de cargas de la máquina. De esta

manera, en la superficie de la probeta cilíndrica, se produce un esfuerzo de flexión alternante de forma sinusoidal, siendo más alto en el cambio de sección de la probeta. Por consiguiente, después de una determinada cantidad de ciclos de carga, la probeta falla a consecuencia de la fatiga producida en el material.

Para determinar el comportamiento a la fatiga S_a por cargas alternantes, se hace uso de la máquina de fatiga por flexión rotativa y se calcula tal y como se presenta en la Ec. 2.2.

$$S_a = \frac{M_b * c}{I} \quad (2.2)$$

El esfuerzo que se produce en el material de la probeta corresponde al de una barra de flexión y que soporta una fuerza F , c es la distancia perpendicular desde el eje neutro hasta el punto más alejado del eje neutro. Por lo que, sobre el material actúa un momento de flexión M_b de forma triangular.

El momento de flexión se calcula a partir de la fuerza de carga F y del brazo de palanca a_p según la Ec. 2.3.

$$M_b = F * a_p \quad (2.3)$$

Introduciendo el momento de Inercia I del material de la probeta cilíndrica, según la Ec. 2.4.

$$I = \frac{\pi * d^3}{32} \quad (2.4)$$

donde:

I es el momento de inercia, y

d es el diámetro de la barra cilíndrica.

Sustituyendo la Ec. 2.3 y Ec. 2.4 en la Ec. 2.2 con sus valores correspondientes, los cuales son a igual a 100.5 mm y d igual a 8 mm, se tiene:

$$S_a = \frac{2.0}{mm^2} F \quad (2.5)$$

La Fig. 2.14 presenta el esquema y componentes de la máquina, los cuales se deben manipular para desarrollar los ensayos de fatiga por flexión rotativa al aire.

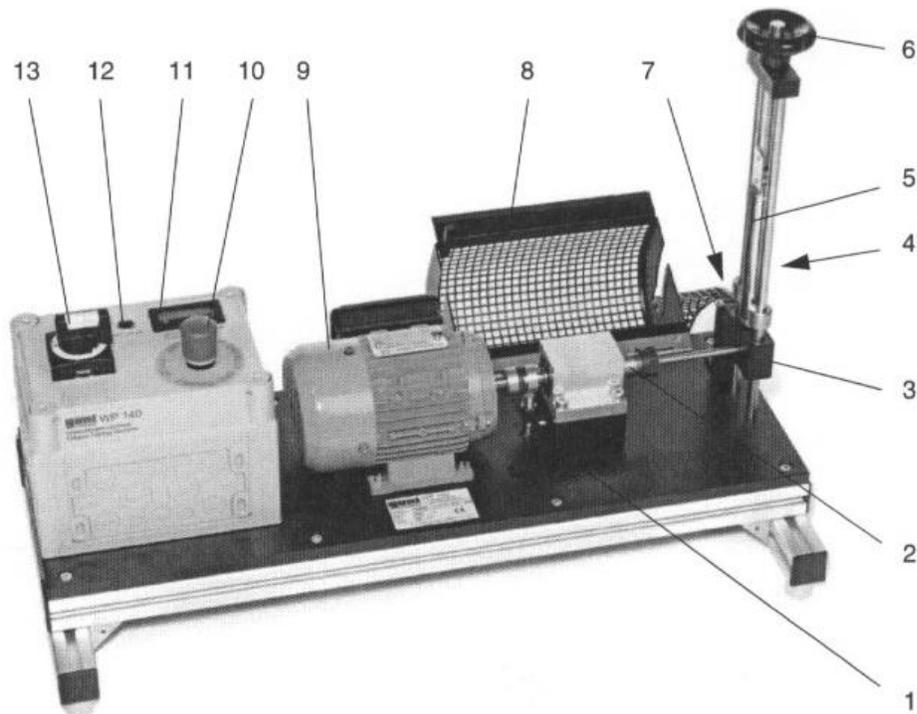


Fig. 2.14. Esquema y componentes de la máquina de fatiga por flexión rotativa. 1 Sensor de aproximación, 2 Husillo con alojamiento para la probeta, 3 Rodamiento de apoyo libre, 4 Escala de carga en Newton (no visible), 5 Balanza de muelle, 6 Volante de mano, 7 Interruptor de aproximación (no visible), 8 Guarda de protección, 9 Motor de accionamiento, 10 Interruptor de paro de emergencia, 11 Contactor, 12 Conector hembra WP14.20 (opcional) y 13 Guardamotor.

El siguiente procedimiento presenta la guía utilizada para el desarrollo del ensayo.

- 1) Retirar la cubierta de protección de la máquina
- 2) Descargar el dispositivo de carga de la máquina
- 3) Instalar la probeta y en el mandril (pinza de sujeción y tuerca) y hacer encajar en el rodamiento.
- 4) Fijar la probeta con el mandril haciendo coincidir la arista de inicio del radio de empalme con el borde del mandril

- 5) Colocar la cubierta de protección de la máquina
- 6) Sacar el interruptor de paro de emergencia
- 7) Poner a cero el contador con el botón de reset (RST)
- 8) Controlar si el husillo se gira suave y circularmente
- 9) Controlar si el contador realiza el conteo de ciclos correctamente (2,800 ciclos de carga por min)
- 10) Controlar si el dispositivo de parada automática funciona
- 11) Elevar, para ello, el rodamiento de apoyo libre acercándolo al dispositivo de carga, para lo cual se debe girar el volante de mano. Entonces, el motor debe detenerse por medio del interruptor de aproximación y
- 12) Después de comprobar el buen funcionamiento de los componentes de la máquina, se puede iniciar con el ensayo.

En la Fig. 2.15 se presenta la máquina de flexión rotativa GUNT WP 140, puesta en marcha, ensayando una probeta de acero AISI 1020.



Fig. 2.15. Máquina de fatiga por flexión rotativa en funcionamiento.

Al fallar la probeta la máquina se detiene automáticamente, pero si alcanza el número de ciclos de carga correspondiente a 5000000 (5 millones) de ciclos la máquina se detiene de forma manual con el interruptor, indicando que se tiene que ensayar a un esfuerzo mayor. Al finalizar del ensayo se anota el número de ciclos que registra el contador al fallar la probeta, en conjunto con el esfuerzo que

se produce en la probeta por la carga aplicada durante el ensayo, esto con la finalidad de utilizar los datos para el análisis de resultados.

2.7. CURVAS S-N APROXIMACIÓN LINEAL POR MÍNIMOS CUADRADOS BAJO NORMA ASTM E 739

Existen diferentes normativas para planificar, realizar e interpretar resultados de ensayos de fatiga por flexión rotativa.

Para caracterizar un material mediante ensayos de fatiga por flexión rotativa sobre las probetas, conviene utilizar una norma de referencia, a fin que el procedimiento estadístico de los resultados sea lo más confiable posible y que la validez de las curvas S-N obtenidas sea homologable por haberse basado en procedimientos ya establecidos, como la norma de la ASTM designación E 739 Internacional, en su versión actualizada, revisada en los años 2004 y 2006.

2.7.1. OBTENCIÓN DE LA CURVA S-N SEGÚN LA NORMA ASTM E 739

En la norma ASTM designación E 739 se toma como variable dependiente (X) la duración o vida en la forma de $\log(N)$, y como variable independiente (Y) el esfuerzo S o su logaritmo $\log(S)$, dependiendo de cuál de las dos aproxime los resultados a una línea recta. Por lo general, para aceros se toma $\log(S)$; por lo tanto, el tipo de curva que se va a considerar es [15]:

$$Y = A + B * X \quad (2.6)$$

$$\mu_{Y|X} = A + B * X \quad (2.7)$$

$$\log(S) = A - B * \log(N) \quad (2.8)$$

Siendo la Ec. 2.8 la que presenta el valor esperado de Y para un X dado, es decir el valor medio de todos los Y para un nivel de esfuerzo X [15].

Una hipótesis simplificativa que se usa es la hipótesis log-normal en duración o vida, ésta es válida y además la varianza de $\log(N)$ es constante en todo el intervalo de ensayo de la variable independiente, es decir, que se supone que la dispersión estadística es independiente del nivel de esfuerzo (S). Esto es una simplificación conveniente pero no real y que deja de tener validez en la zona de esfuerzos más bajos y cuando existan datos de probetas que no fallen [15].

Tabla 2.5. Número mínimo de probetas para caracterizar un material según la norma ASTM designación E 739.

Tipo de ensayo	Número mínimo de probetas	% reproducibilidad Pr mínimo
Preliminar y exploratorio	6-12	17-33
Ensayos para investigación y desarrollo de componentes y probetas	6-12	35-50
Datos válidos para diseño	12-24	50-75
Datos para fiabilidad	12-24	75-88

La norma define valores orientativos del número mínimo de probetas a ensayar dependiendo de la finalidad que se quiera dar a los resultados. La Tabla 2.5 presenta lo anteriormente descrito, en donde se presenta el intervalo de probetas mínimo para realizar los ensayos. Aparte del número probetas ensayadas k , el número de niveles n_s de esfuerzo a los que se hacen ensayos tiene también influencia en la calidad de los resultados, por lo que la norma establece un coeficiente llamado Porcentaje de Reproducibilidad P_r , tal como lo presenta la Ec. 2.9 [15].

$$P_r = 100 - \left(1 - \frac{n_s}{k}\right) \quad (2.9)$$

Según la norma ASTM designación E739, cuando todos los ensayos hayan conducido a la rotura de las probetas, los valores de los estimadores más probables de A y B se obtienen como [15]:

$$\hat{A} = \bar{Y} - \hat{B} * \bar{X} \quad (2.10)$$

$$\hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \quad (2.11)$$

Siendo:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^k X_i}{k} = \frac{\sum_{i=1}^k \log S_i}{k} \quad (2.12)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^k Y_i}{k} = \frac{\sum_{i=1}^k \log N_i}{k} \quad (2.13)$$

En este capítulo se han desarrollado todas las etapas del diseño experimental de los ensayos de fatiga al aire por flexión rotativa. En el siguiente capítulo se presentarán los resultados obtenidos a partir de los ensayos para los 3 diferentes radios de acuerdo de las probetas de acero AISI 1020 bajo dos niveles de esfuerzo y que, debido a la dispersión de los resultados, es necesario hacer uso de la sección 2.7 de este trabajo ya que se hace una aproximación lineal por el método de mínimos cuadrados.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de fatiga por flexión rotativa aplicando el procedimiento experimental descrito en el capítulo 2. Así también, contiene las correspondientes tablas que resumen los resultados de los ensayos para los tres diferentes radios de acuerdo de 8, 16 y 40 mm, y las tablas de los cálculos correspondientes a la obtención de la ecuación lineal por el método de mínimos cuadrados. También, se presentan las gráficas en escala doblemente logarítmica de esfuerzo (S) vs vida (N) de los resultantes experimentales de los ensayos de fatiga por flexión rotativa, realizándose las aproximaciones conforme a la normativa ASTM para ensayos de fatiga al aire. Se finaliza con un análisis de los resultados de los ensayos superponiendo las tres curvas de resistencia a la fatiga correspondientes a los diferentes radios de acuerdo.

3.1. ENSAYOS DE FATIGA

Tras el desarrollo de los ensayos, se obtuvo resultados para cada lote de probetas organizado por su respectivo radio de acuerdo. La resistencia a la fatiga para los tres radios de acuerdo ensayados se obtuvo a partir de dos niveles de esfuerzo y para cada uno de ellos se ensayaron 12 probetas para radios de acuerdo de 8, 16 y 40 mm, haciendo un total de 36 probetas. Debido a resultados atípicos obtenidos en los ensayos de laboratorio, para los radios de acuerdo de 8 y 40 mm, se han determinado las ecuaciones de resistencia a la fatiga considerando 8 y 10 probetas, respectivamente, sin embargo, se presentan todos los resultados y se especifican cuáles probetas ensayadas se tomarán en cuenta para el análisis. Se aplicó el método de aproximación lineal por mínimos cuadrados para obtener las curvas para cada radio de acuerdo. Se consideró una vida finita 5×10^6 ciclos.

Para las probetas cuyo radio de acuerdo consta de 8 mm, se presenta el número de probetas y el nivel de esfuerzo al que fueron sometidas, en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados de ensayos de fatiga para determinar la resistencia a la fatiga de un acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 8 mm.

Probetas #	S _i , MPa	N _f , ciclos	Probetas #	S _i , MPa	N _f , ciclos
1	360	378804	7	340	174930
2		293361	8		400485
3		550180	9		546977
4		427639	10		98077
5		224537	11		186571
6		973180	12		767785

Para el lote de probetas con radio de acuerdo de 8 mm, el porcentaje de reproducibilidad se obtiene con la Ec. 2.9, valiéndose de dos niveles de esfuerzo, uno de 360 MPa y otro de 340 MPa y un número total de 8 probetas. El valor del porcentaje de reproducibilidad se presenta a continuación.

$$P_r = 100 * \left(1 - \frac{2}{8}\right) = 75 = \% \text{ reproducibilidad}$$

Del total de probetas ensayadas se adoptaron los resultados obtenidos de 8 de ellas, lo cual se decidió por presentar una baja dispersión, esto brinda la confiabilidad en los resultados obtenidos. Queda a tentativa para el lector el desarrollo de ensayos utilizando un mayor número de probetas bajo un número más grande de niveles de esfuerzo y así obtener una mayor confiabilidad en los resultados obtenidos. Por motivos diversos no se logró llevar a cabo un mayor número de ensayos a un número más grande de niveles de esfuerzo. Sin embargo, los resultados obtenidos, y el porcentaje de reproducibilidad muestran una confiabilidad a niveles de datos válidos para investigación y desarrollo de componentes y probetas, según la Tabla 2.5 de la sección 2.7.1.

Los resultados obtenidos y utilizados para cálculos, de probetas ensayadas dotadas con radio de acuerdo de 8 mm se listan en la Tabla 3.2. El esfuerzo que actúa en cada probeta es obtenido a través de la Ec. 2.5 de la sección 2.6.

Tabla 3.2. Resultados de ensayos de fatiga, utilizados para determinación de la resistencia a la fatiga de un acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 8 mm.

Probetas #	Log (S _i , MPa)	Log (N _f , ciclos)	Probetas #	Log (S _i , MPa)	Log (N _f , ciclos)
1	2.56	5.58	8	2.53	5.60
2	2.56	5.47	9	2.53	5.74
4	2.56	5.63	11	2.53	5.27
5	2.56	5.35	12	2.53	5.89

Utilizando el método de aproximación lineal de mínimos cuadrados descrito en la sección 2.7, se obtienen los valores medios logarítmicos para los valores que presenta la Tabla 3.2.

$$\overline{\text{Log}S_i} = 2.54$$

$$\overline{\text{Log}(N_f)} = 5.57$$

El desarrollo de los procesos necesarios para la aplicación de aproximación lineal de mínimos cuadrados, se presenta en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Resultados del criterio de aproximación lineal por mínimos cuadrados para los ensayos de las probetas con radio de acuerdo de 8 mm.

$\text{Log}S_i - \overline{\text{Log}S_i}$	$\text{Log}N_f - \overline{\text{Log}(N_f)}$	$(\text{Log}S_i - \overline{\text{Log}S_i})(\text{Log}N_f - \overline{\text{Log}(N_f)})$	$(\text{Log}S_i - \overline{\text{Log}S_i})^2$
0.01	0.01	0.000159019	0.00015405
0.01	-0.10	-0.001218841	0.00015405
0.01	0.07	0.000812658	0.00015405
0.01	-0.21	-0.00266003	0.00015405
-0.01	0.04	-0.000459033	0.00015405
-0.01	0.17	-0.002139376	0.00015405
-0.01	-0.29	0.003658481	0.00015405
-0.01	0.32	-0.003967268	0.00015405
Total		-0.00581439	0.00123242

Los valores de \hat{A} y \hat{B} , son determinados por medio de la Ec. 2.12 y la Ec. 2.13 de la sección 2.7.1, tal como se presentan.

$$\hat{A} = 17.567327$$

$$\hat{B} = -4.7178616$$

Según la Ec. 2.10 de la sección 2.7.1, la función para describir la tendencia de la gráfica para probetas con radio de acuerdo de 8 mm se expresa como sigue.

$$\log(N) = 17.6 - 4.7 * \log(S)$$

Otorgando la condición de variable dependiente al esfuerzo (S) se obtiene la siguiente función, la cual describe la tendencia de la curva descrita por los ensayos realizados, esto da como resultado la Ec. 3.1.

$$\log(S) = 3.7236 - 0.212 * \log(N) \quad (3.1)$$

En la Fig. 3.1 se presenta una gráfica con el comportamiento de la Ec. 3.1 que rige la trayectoria de la serie de datos resultantes de los ensayos desarrollados en probetas de acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 8 mm. En la Tabla 3.4 se muestra los resultados de fatiga aproximados por el método lineal de mínimos cuadrados utilizados para la tendencia de la gráfica Log(S) vs Log(N) de la Fig. 3.1.

Tabla 3.4. Resultados aproximados por el método lineal de mínimos cuadrados de ensayos de fatiga, utilizados para determinación de la resistencia a la fatiga de un acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 8 mm.

Probetas #	Log (S _i , MPa)	Log (N _f , ciclos)	Probetas #	Log (S _i , MPa)	Log (N _f , ciclos)
1	2.54	5.58	8	2.54	5.60
2	2.56	5.47	9	2.51	5.74
4	2.53	5.63	11	2.61	5.27
5	2.59	5.35	12	2.48	5.89

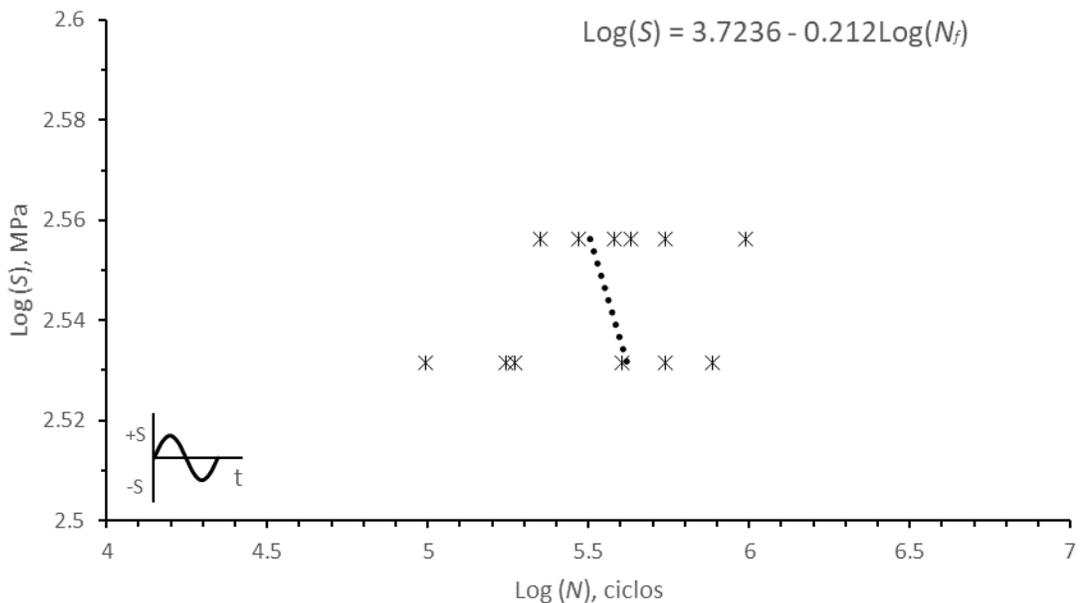


Fig. 3.1. Representación gráfica log(S) vs log(N) de probetas de acero AISI 1020 ensayadas a fatiga por flexión rotativa para un radio de acuerdo de 8 mm.

Para las 12 probetas de acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 16 mm la Tabla 3.5 presenta los niveles de esfuerzo a los que se sometieron y los ciclos soportados por cada una de ellas.

Tabla 3.5. Resultados de ensayos de fatiga para determinar la resistencia a la fatiga de un acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 16 mm.

Probetas #	S _i , MPa	N _f , ciclos	Probetas #	S _i , MPa	N _f , ciclos
1	380	233662	7	360	890792
2		374167	8		387150
3		517051	9		425527
4		224185	10		659023
5		271974	11		268688
6		2581110	12		1684178

Para los ensayos de probetas de radios de acuerdo de 16 mm, el porcentaje de reproducibilidad se obtiene a partir de Ec. 2.9 de la sección 2.7.1, para niveles de esfuerzo de 380 y 360 MPa y un número de probetas de 12 se tiene su respectivo porcentaje de reproducibilidad.

$$P_r = 100 * \left(1 - \frac{2}{12}\right) = 83.33 = \% \text{ Reproducibilidad}$$

El valor de reproducibilidad indica la confiabilidad de los resultados obtenidos, otorgando un nivel de datos para investigación y desarrollo de componentes y probetas.

En la Tabla 3.6, detalla los resultados de esfuerzo y ciclos para probetas con radio de acuerdo de 16 mm.

Tabla 3.6. Resultados de ensayos de fatiga en logaritmo para determinar la resistencia a la fatiga de un acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 16 mm.

Probetas #	Log (S _i , MPa)	Log (N _f , ciclos)	Probetas #	Log (S _i , MPa)	Log (N _f , ciclos)
1	2.58	5.37	7	2.56	5.95
2	2.58	5.57	8	2.56	5.59
3	2.58	5.71	9	2.56	5.63
4	2.58	5.35	10	2.56	5.82
5	2.58	5.43	11	2.56	5.43
6	2.58	6.41	12	2.56	6.23

Utilizando el método de aproximación lineal de mínimos cuadrados descrito con anterioridad, se obtienen los valores medios logarítmicos para los valores que presenta la Tabla 3.6.

$$\overline{\log S_i} = 2.57$$

$$\overline{\log(N_f)} = 5.71$$

El desarrollo de los procesos necesarios para la aplicación de aproximación lineal de mínimos cuadrados, se presenta en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Resultados del criterio de aproximación lineal por mínimos cuadrados para los ensayos de las probetas con radio de acuerdo de 16 mm.

$\text{Log}S_i - \overline{\text{Log}S_i}$	$\text{Log}N_f - \overline{\text{Log}(N_f)}$	$(\text{Log}S_i - \overline{\text{Log}S_i})(\text{Log}N_f - \overline{\text{Log}(N_f)})$	$(\text{Log}S_i - \overline{\text{Log}S_i})^2$
0.01	-0.34	-0.003982188	0.00013784
0.01	-0.13	-0.001581512	0.00013784
0.01	0.01	6.76585E-05	0.00013784
0.01	-0.36	-0.004193301	0.00013784
0.01	-0.27	-0.003208025	0.00013784
0.01	0.70	0.008265768	0.00013784
-0.01	0.24	-0.00284128	0.00013784
-0.01	-0.12	0.00140759	0.00013784
-0.01	-0.08	0.000925665	0.00013784
-0.01	0.11	-0.001304727	0.00013784
-0.01	-0.28	0.003270004	0.00013784
-0.01	0.52	-0.006088853	0.00013784
Total		-0.0092632	0.001654086

Los valores de \hat{A} y \hat{B} , son determinados por medio de la Ec. 2.12 y la Ec. 2.13 de la sección 2.7.1, y se obtiene lo que sigue.

$$\hat{A} = 20.08930923$$

$$\hat{B} = -5.60019376$$

Según la Ec. 2.10 de la sección 2.7.1, la función para describir la tendencia de la gráfica para probetas con radio de acuerdo de 16 mm se expresa como sigue.

$$\log(N) = 20.09 - 5.6 * \log(S)$$

Otorgando la condición de variable dependiente al esfuerzo (S) se obtiene la siguiente función, la cual describe la tendencia de la curva descrita por los ensayos realizados. Esto da como resultado la Ec. 3.2.

$$\log (S) = 3.587 - 0.178 * \log (N) \quad (3.2)$$

En la Fig. 3.2 se presenta gráficamente el comportamiento de la Ec. 3.2 que rige la trayectoria de la serie de datos resultantes de los ensayos desarrollados en probetas de acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 16 mm. En la Tabla 3.8 se muestra los resultados de fatiga aproximados por el método lineal de mínimos cuadrados utilizados para la tendencia de la gráfica Log(S) vs Log (N) de la Fig. 3.2.

Tabla 3.8. Resultados aproximados por el método lineal de mínimos cuadrados de ensayos de fatiga, utilizados para determinación de la resistencia a la fatiga de un acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 16 mm.

Probetas #	Log (S_i , MPa)	Log (N_f , ciclos)	Probetas #	Log (S_i , MPa)	Log (N_f , ciclos)
1	2.63	5.37	7	2.52	5.95
2	2.59	5.57	8	2.59	5.59
3	2.57	5.71	9	2.58	5.63
4	2.63	5.35	10	2.55	5.82
5	2.62	5.43	11	2.62	5.43
6	2.44	6.41	12	2.48	6.23

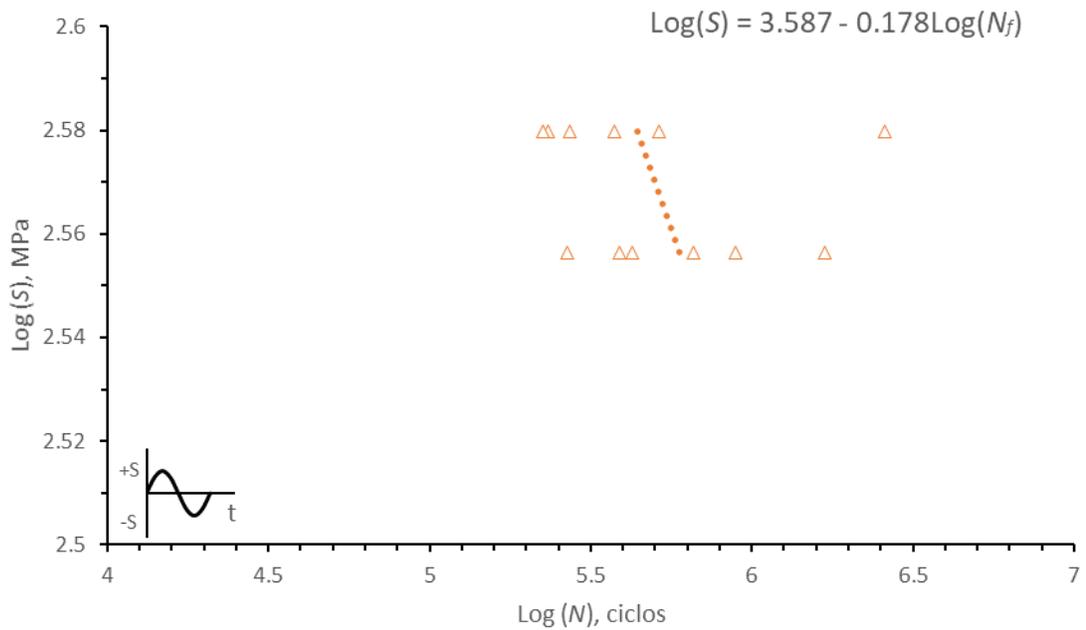


Fig. 3.2. Representación gráfica $\log(S)$ vs $\log(N)$ de probetas de acero AISI 1020 ensayadas a fatiga por flexión rotativa para un radio de acuerdo de 16 mm.

La Tabla 3.9, expone los resultados de las 12 probetas de acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 40 mm, los niveles de esfuerzo a los que se sometieron y los ciclos que soportó cada una de ellas.

Tabla 3.9. Resultados de ensayos de fatiga para determinar la resistencia a la fatiga de un acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 40 mm.

Probetas #	S_i , MPa	N_f , ciclos	Probetas #	S_i , MPa	N_f , ciclos
1	380	553866	7	360	173282
2		58472	8		122239
3		635256	9		1552846
4		1018944	10		321268
5		785246	11		328814
6		1111179	12		1398608

Para los ensayos de las probetas de radios de acuerdo de 40 mm, el porcentaje de reproducibilidad, se obtiene a partir de Ec. 2.9 de la sección 2.7.1, para niveles de esfuerzo de 380 MPa y 360 MPa y un número de probetas de 10, se obtiene su respectivo porcentaje de reproducibilidad.

$$P_r = 100 * \left(1 - \frac{2}{10}\right) = 80 = \% \text{ Reproducibilidad}$$

El valor de reproducibilidad indica la confiabilidad de los resultados obtenidos, otorgando un nivel de datos para investigación y desarrollo de componentes y probetas.

Del total de probetas ensayadas se adoptaron los resultados obtenidos de 10 de ellas, lo cual se decidió por la baja dispersión que presentaron, ya que esto brinda la confiabilidad en los resultados que se obtuvieron.

Los resultados obtenidos y utilizados para cálculos, de probetas ensayadas dotadas con radio de acuerdo de 40 mm se listan en la Tabla 3.10. El esfuerzo producido en cada probeta es obtenido a través de la Ec. 2.5 de la sección 2.6.

Tabla 3.10. Resultados de ensayos de fatiga en logaritmo para determinar la resistencia a la fatiga de un acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 40 mm.

Probetas #	Log (S _i , MPa)	Log (N _f , ciclos)	Probetas #	Log (S _i , MPa)	Log (N _f , ciclos)
1	2.58	5.74	7	2.56	5.24
2	2.58	4.77	9	2.56	6.19
3	2.58	5.80	10	2.56	5.51
4	2.58	6.01	11	2.56	5.52
5	2.58	5.90	12	2.56	6.15

Utilizando el método de aproximación lineal de mínimos cuadrados descrito anteriormente, se obtienen los valores medios logarítmicos para los valores que presenta la Tabla 3.8.

$$\overline{\log S_i} = 2.57$$

$$\overline{\log(N_f)} = 5.68$$

El desarrollo de los procesos necesarios para la aplicación de esta aproximación lineal de mínimos cuadrados, se presenta en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11. Resultados del criterio de aproximación lineal por mínimos cuadrados para los ensayos de las probetas con radio de acuerdo de 40 mm.

$\log S_i - \overline{\log S_i}$	$\log N_f - \overline{\log(N_f)}$	$(\log S_i - \overline{\log S_i})(\log N_f - \overline{\log(N_f)})$	$(\log S_i - \overline{\log S_i})^2$
0.01	0.06	0.000725794	0.00013784
0.01	-0.91	-0.010738344	0.00013784
0.01	0.12	0.001424874	0.00013784
0.01	0.33	0.003834052	0.00013784
0.01	0.21	0.002505673	0.00013784
-0.01	-0.44	0.005199089	0.00013784
-0.01	0.51	-0.005982315	0.00013784
-0.01	-0.17	0.002051283	0.00013784
-0.01	-0.16	0.001932905	0.00013784
-0.01	0.46	-0.005448914	0.00013784
Total		-0.004495904	0.001378405

Los valores de \hat{A} y \hat{B} , son determinados por medio de las Ec. 2.12 y Ec. 2.13 de la sección 2.7.1. Se obtiene lo que sigue:

$$\hat{A} = 14.05769884$$

$$\hat{B} = -3.261671775$$

Según la Ec. 2.10 de la sección 2.7.1, la función para describir la tendencia de la gráfica para probetas con radio de acuerdo de 8 mm se expresa como se presenta a continuación.

$$\log(N) = 14.06 - 3.26 * \log(S)$$

Otorgando la condición de variable dependiente al esfuerzo (S) se obtiene la siguiente función, la cual describe la tendencia de la curva descrita por los ensayos realizados, generándose la Ec. 3.3.

$$\log(S) = 4.31 - 0.306 * \log(N) \quad (3.3)$$

En la Fig. 3.3 se presenta una gráfica del comportamiento de la Ec. 3.3, que rige la trayectoria de la serie de datos resultantes de los ensayos desarrollados en probetas de acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 40 mm. En la Tabla 3.12 se muestra los resultados de fatiga aproximados por el método lineal de mínimos cuadrados utilizados para la tendencia de la gráfica $\text{Log}(S)$ vs $\text{Log}(N)$ de la Fig. 3.3.

Tabla 3.12. Resultados aproximados por el método lineal de mínimos cuadrados de ensayos de fatiga, utilizados para determinación de la resistencia a la fatiga de un acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 40 mm.

Probetas #	Log (S_i , MPa)	Log (N_f , ciclos)	Probetas #	Log (S_i , MPa)	Log (N_f , ciclos)
1	2.55	5.74	7	2.70	5.24
2	2.85	4.77	9	2.41	6.19
3	2.53	5.80	10	2.62	5.51
4	2.47	6.01	11	2.62	5.52
5	2.50	5.90	12	2.43	6.15

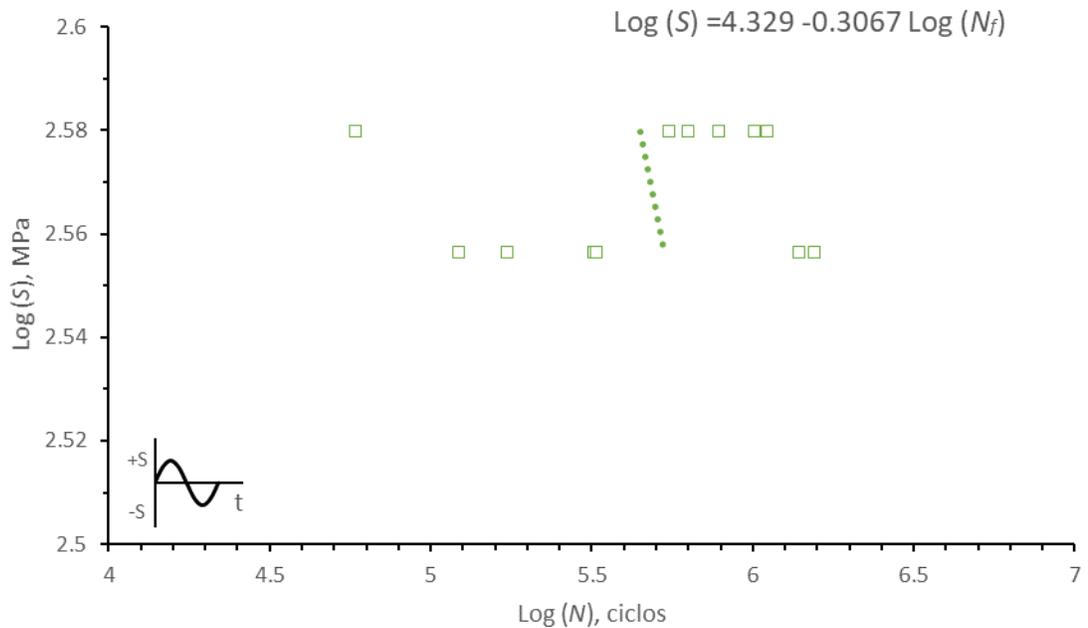


Fig. 3.3. Representación gráfica $\log(S)$ vs $\log(N)$ de probetas de acero AISI 1020 ensayadas a fatiga por flexión rotativa para un radio de acuerdo de 40 mm.

En la Fig. 3.4 se presenta la curva resultante de los ensayos de fatiga por flexión rotativa para los tres radios de acuerdo en estudio, se presenta marcada la diferencia en la resistencia a la fatiga para los tres radios. Para el radio de acuerdo de 8 mm se presenta una resistencia a la fatiga mucho menor en comparación con los radios de 16 y 40 mm.

Para el radio de acuerdo de 40 mm se observa una mayor resistencia a la fatiga.



Fig. 3.5. Probeta de acero AISI 1020 con radio de acuerdo de 8 mm ensayada por fatiga a flexión rotativa.

3.2. CONCENTRADORES DE ESFUERZOS POR FATIGA EN LAS PROBETAS DE ACERO AISI 1020

Es importante conocer por qué los resultados de los ensayos obtenidos presentan la tendencia de la curva generada por las probetas de acero AISI 1020, con radios de acuerdo de 40 mm y 16 mm, una resistencia a la fatiga mayor que el radio de acuerdo de 8 mm. Para esto, se obtendrá la curva promedio para los radios de acuerdo de 16 mm y 40 mm y se asumirá un K_t igual a 1.0 para esta curva promedio. Así se sacará K_t en relación con la curva o ecuación del radio de acuerdo de 8 mm con respecto a la curva o ecuación promedio de los radios de acuerdo de 16 mm y 40 mm.

Si bien, en la sección 1.1.5, la Fig. 1.2 se presenta las curvas para obtener el factor de concentración de esfuerzos K_t , debido a las dimensiones de nuestras probetas, no es posible determinar dicho nivel ya que la relación de los radios de acuerdo entre el diámetro de la sección menor r/d están limitados para un valor de 0.30.

En la Fig. 3.6 se presenta la curva S-N promedio de los resultados de las probetas de acero de radios de acuerdo de 16 mm y 40 mm el cual se asume un factor de concentrador de esfuerzos K_t de 1.0.

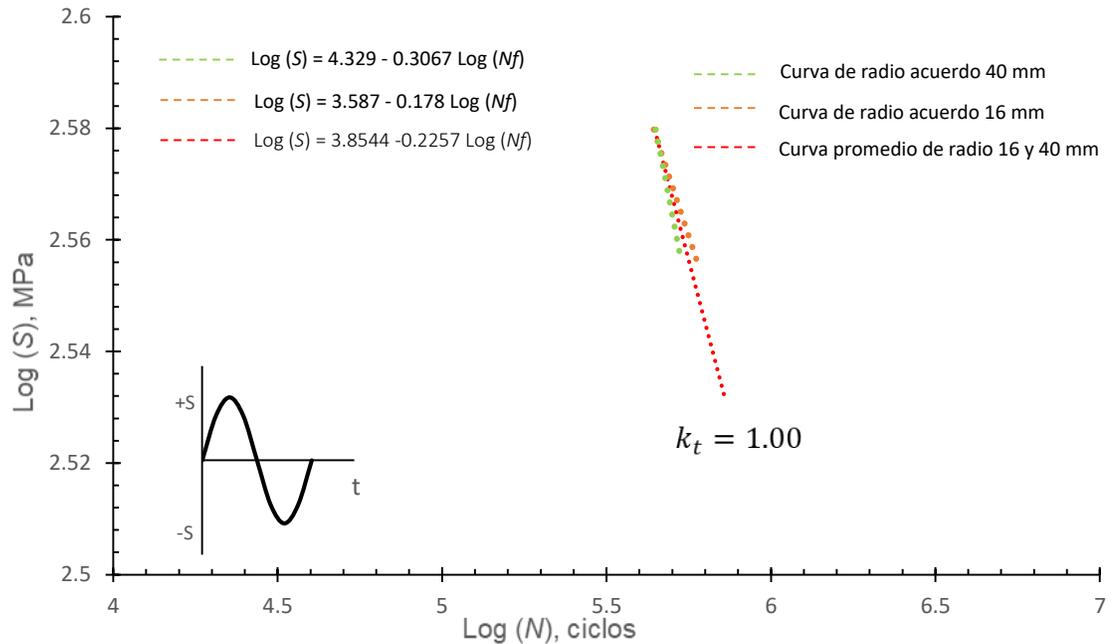


Fig. 3.6. Representación gráfica $\log(S)$ vs $\log(N)$ de probetas de acero AISI 1020 ensayadas a fatiga por flexión rotativa para los radios de acuerdo de 16 mm y 40 mm y la representación gráfica promedio.

Para sacar el factor de concentrador de esfuerzo para las probetas de radio de acuerdo de 8 mm se relaciona con la curva promedio el cual, se asumió de 1.0; para que ambas curvas tengan la misma posición dentro de la gráfica $\log(S)$ vs $\log(N)$, el factor que debe multiplicar a la curva resultante de las probetas de 8 mm es de 1.05 tal y como se muestra en la Fig. 3.7.

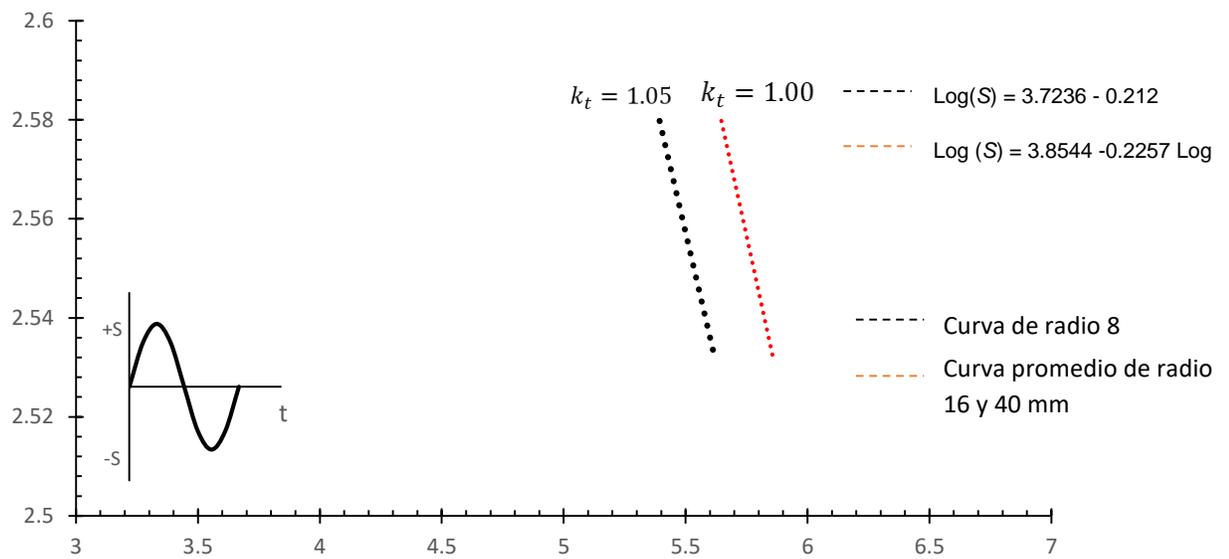


Fig. 3.7. Representación gráfica $\log(S)$ vs $\log(N)$ de probetas de acero AISI 1020 ensayadas a fatiga por flexión rotativa para los radios de acuerdo de 16 mm y 40 mm y la representación gráfica promedio.

Se observa un incremento de la resistencia a la fatiga para los radios de acuerdo de 16 y 40 mm del 5% con respecto a las probetas de radio de acuerdo de 8 mm.

4. DETERMINACIÓN DE COSTOS

Costos es una palabra muy utilizada, pero nadie ha logrado definirla con exactitud debido a su amplia utilización, pero se puede decir que el costo es un desembolso en efectivo o en especie hecho en el pasado (Costos hundidos), presente (inversión), en el futuro (costos futuros) o en forma virtual (costos de oportunidad). A los costos o desembolsos hechos en el presente (tiempo cero) en una evaluación económica se les llama inversión [17].

En este capítulo se presenta una determinación de costos de preparación y ensayo de probetas de acero AISI 1020 a fatiga por flexión rotativa; es decir, se realiza un análisis desde el proceso de compra de material hasta el costo por laboratorista.

Se elabora una determinación de costos del valor de realizar estos ensayos a partir de la materia prima, consumibles y mano de obra, cuyos costos son significativos en el desarrollo de todo tipo de proyecto, ya sea de investigación, diseño o construcción, de los cuales no se puede prescindir ya que de estos depende la puesta en marcha de éste. Es por esto que en el desarrollo de proyectos (investigación, diseño o construcción) es indispensable realizar una determinación de costos. De esta manera se puede apreciar la factibilidad del desarrollo de proyectos similares a futuro, teniendo en cuenta algunas variantes en dichos proyectos.

Se maquinaron y lijaron 150 probetas en total, aunque solo se reportaron 36 probetas, 12 por cada radio de acuerdo, y además se prepararon 2 probetas adicionales para cada curva. Así, la primera probeta preparada adicionalmente se utilizó para establecer cuál es el nivel de esfuerzo más bajo y la segunda se utilizó para establecer el nivel superior de esfuerzo para la primera curva y para las otras dos curvas las 2 probetas se utilizan para sustituir aquellos ensayos en donde existen cortes de corriente eléctrica, fallos prematuros o cualquier tipo de desperfecto o alteración de resultados que pudieran dispersar los resultados.

4.1. COSTOS DE MATERIA PRIMA

Para la realización de los ensayos de fatiga por flexión rotativa en un acero AISI 1020, la empresa distribuidora ABASTEINSA DE C.V., en calle Gerardo Barrios N° 1213, San Salvador El Salvador, fue la distribuidora elegida en donde se adquirió el material en un lote de 6 barras cilíndricas con diámetro de 25.4 mm (½ pulg) y longitudes de 6 metros, por un costo de **\$ 84.00** dólares de los Estados Unidos de Norte América.

Para las 6 barras de acero, con sus respectivas dimensiones y teniendo en cuenta la longitud de la probeta (ver, Fig. 2.6) que es de 146 mm, la cantidad de probetas es de 42, por lo que el costo por probeta es de **\$ 2.00**.

Para una mejor presentación, en la Tabla 4.1 se presenta el detalle del costo por materia prima de las barras de acero AISI 1020 el cual se obtuvo un costo fijo total de **\$ 2.00** por espécimen.

Tabla 4.1. Detalle del costo de la materia prima de acero AISI 1020 ensayada a fatiga por flexión rotativa.

Materia prima	Costos por barra de 6 m, \$	Costo por unidad, \$
Acero AISI 1020	84.00	14.00
	Costo por probeta	(2.00)

4.2. COSTOS POR MAQUINADO

Como propuesta del presente trabajo de graduación, por la naturaleza de este estudio, se propuso la determinación de costos del maquinado de las probetas en el torno CNC.

El maquinado de las probetas se analizó para un torno CNC ubicado en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Universidad de El Salvador, donde se realizó el maquinado de 42 probetas (ver, Fig. 2.7).

Para el cálculo del costo por el uso de equipos se procede como se explica a continuación.

Para calcular el costo de depreciación de la maquinaria (D_p) se tomó como base el artículo 30 de la ley de impuesto sobre la renta de El Salvador, el cual establece el valor residual de la maquinaria luego de su uso o explotación según se presenta en la Tabla 4.2, y se utilizó el método de línea recta para el cálculo de su depreciación.

En la Fig. 2.7 se presentó el torno usado para el maquinado de las probetas. El torno es de la marca ALECOP, modelo EXPERT el cual tiene un costo de \$ 19,775.00 dólares de los Estados Unidos de Norte América. Este torno cuenta con una vida útil de 10 años. Se hizo uso de la Ec. 4.1 para el cálculo de la depreciación del equipo D_p .

$$D_p = \frac{P - L}{n} \quad (4.1)$$

donde:

- D_p : La depreciación del equipo
- P : El costo inicial
- L : El valor residual
- n : La vida útil de la máquina

Tabla 4.2. Porcentaje de valor de la maquinaria luego de su uso o explotación.

Años de vida	Porcentaje del precio de la maquinaria o bienes muebles usados, %
1	80
2	60
3	40
4 o más	20

Sustituyendo en la Ec. 4.1 por los valores del torno CNC se obtiene el siguiente valor de depreciación.

$$D_p = \frac{\$ 19775 - (\$ 19775 * 60\%)}{10} = \$ 791.00$$

En el año 2 (para el valor de salvamento), es donde recaen los años de adquisición de la máquina y a su vez de desarrollo de esta investigación. Para el maquinado de las 42 probetas, el cual, el tiempo total de las probetas fue de 17.5 h, la depreciación del torno CNC por hora es de \$ 0.09 por lo que el costo variable para la depreciación de la máquina, de una probeta es de **\$ 0.04**.

Por otra parte, para determinar el costo de consumo eléctrico del torno CNC, el cual se considera un costo fijo, fue pertinente obtener un precio de consumo de energía eléctrica correspondiente al municipio de San Salvador del departamento de San Salvador, donde se encuentra ubicada la Universidad de El Salvador.

Este costo se obtuvo por medio de la distribuidora de energía eléctrica AESS El Salvador, quienes proporcionaron los datos del costo de consumo por kilovatios/hora (kWh), siendo este de catorce centavos (US\$ 0.14). Estos valores serán empleados para los equipos que lo requieran.

El costo por mano de obra directa se atribuye a un estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, como instructor de la cátedra de Procesos de Fabricación, debido a los conocimientos adquiridos durante su etapa de formación, está capacitado para la manipulación del torno CNC. Esta persona, según la Ley Orgánica de la Universidad de El Salvador, es remunerada con \$ 300.00 mensuales. Se asume que debe cumplir con 105 min por día (tiempo que dura una clase teórica y de discusión de la cátedra) con asesorías que tengan que ver con la materia, durante los 5 días de la semana. Las 17.5 h dedicadas para el maquinado de las 42 probetas equivalen a \$ 150.00, haciendo un total de \$ 3.57 por cada probeta maquinada. De manera indirecta, se asume el costo del supervisor, en este caso, el docente encargado de la cátedra de Procesos de Fabricación. Se asume que es Profesor Universitario de categoría I, con un salario mensual de 1,300.00 según el Reglamento General del Sistema Escalonario del Personal de la Universidad de El Salvador publicado en el Diario Oficial N°88, tomo N°353, del 16 de mayo de 2003, quien, si está contratado por tiempo completo, debe cumplir un total de 40 h semanales. Esta persona realiza el control de calidad de las probetas con las mediciones de

las probetas maquinadas. Para las 17.5 h de tiempo de maquinado, este costo por mano de obra indirecta equivale a \$ 3.38 por probeta maquinada. El costo variable total por mano de obra, sumando el costo directo del instructor más el costo indirecto, del docente, es igual a **\$ 6.95** por probeta maquinada.

El tiempo de maquinado se tomó de manera experimental obtenido durante el proceso, el cual promedió un total de 25 min por probeta. Este tiempo representa 5/12 h.

El consumo de energía por hora se obtiene de la multiplicación de la tarifa de consumo eléctrico por hora, el tiempo de uso de la máquina y la potencia que consume el equipo, siendo el costo de consumo energético C. C. E. por probeta es de:

$$\text{C. C. E. torno CNC por Probeta} = 0.7 \text{ kW} * \frac{5}{12} \text{ h} * \$ 0.14 \text{ kWh} \quad (4.2)$$

$$\text{C. C. E. torno CNC por Probeta} = \$ 0.04$$

Otro costo a considerar para el maquinado de las probetas es el valor que representa los consumibles, el cual se considera un costo variable. Se utilizan para llevar a cabo el proceso del maquinado tales como el aceite lubricante para proteger las guías del torno CNC y para evitar corrosión en la superficie de las probetas una vez maquinadas, siendo el aceite utilizado 1 galón de 20W50 semi sintético costando \$ 18.50, el cual, una parte de ese galón se llena en recipientes plásticos por lote de 7 probetas cada uno sumergidos en dicho aceite; 2 brochas para limpieza de viruta generada por el material a \$ 0.55 cada una; 1 libra de wiper costando \$ 1.00 para limpiar la superficie de las probetas luego del proceso de corte; 7 recipientes para colocar las probetas maquinadas con el aceite costando \$ 1.50 cada recipiente; y se utilizó 1 kits de insertos ya que con un inserto, se maquinaron 12 probetas, es decir, 6 probetas por filo del inserto, cuyo valor por kit es de \$ 72.90, estos kits contienen 10 insertos, por lo que cada inserto tiene el costo de \$ 7.29, utilizando solo 4 insertos, los cuales fueron destinados

para el maquinado de las 42 probetas, cada uno equivale a \$ 0.69 del costo de los insertos. Añadiendo cada uno de estos consumibles y sumando se obtiene un costo total de **\$ 0.75**.

También, el costo del local, siendo este un costo fijo, en el cual se encuentra el torno CNC, influye en esta determinación ya que, al realizarse el maquinado por probeta, representado por 5/12 h, para las 42 probetas, representa un total de 17.5 h, tiempo para nada despreciable. En la zona central del municipio de San Salvador, un local tiene un costo de renta mensual entre \$ 300.00 a \$ 500.00, partiendo del costo mínimo de renta de \$ 300.00; el local se utiliza 8 h al día por 5 días de la semana. Partiendo que el local consta con un área de 35 m², el área útil para el proceso de maquinado del local es aproximadamente 3 m², área suficiente para realizar el maquinado en el torno CNC dentro del local. Para cada probeta, el costo del local para un tiempo de 17.5 h para el maquinado de las 42 probetas, representa un total de **\$ 0.06**.

Además, se tiene que agregar el costo del consumo eléctrico del local ya que, al trabajar en condiciones no favorables para la visibilidad, se necesita hacer uso de la luminosidad instalada en el local. El local utilizado es el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, el cual tiene 8 tubos fluorescentes de luz blanca, de los cuales, solo 2 tubos son necesarios para alumbrar el área de trabajo del torno CNC; además cada tubo consume 32 W, por consiguiente, la energía consumida es de 560 W/h o 0.56 kWh por cada tubo fluorescente; asumiendo que no se tiene cobro por demanda máxima entonces el total consumido es de 1.12 kWh; para cada probeta, el costo de los 2 tubos fluorescentes es de **\$ 0.07**.

Sumando el costo de la renta del local y el costo por consumo eléctrico de la luminosidad del local, el costo total del local entonces equivale a **\$ 0.13** por probeta maquinada.

En la Tabla 4.3 se presenta el detalle de los costos por maquinado de cada probeta de acero AISI 1020 el cual da un total de **\$ 7.91** por probeta maquinada.

Tabla 4.3. Detalle de costos por maquinado de las probetas de acero AISI 1020 para ensayos de fatiga por flexión rotativa.

Proceso de maquinado por probeta	Costo por probeta, \$
Depreciación	0.04
Costo por mano de obra	6.95
Consumo energético	0.04
Consumibles	0.75
Costo del local	0.13
Costo total por probeta maquinada	7.91

4.3. COSTOS DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE RECOCIDO

Como etapa posterior al maquinado se realizó un tratamiento térmico de recocido para alivio de esfuerzos residuales de la manera descrita en la sección 2.4 de este trabajo, cuyo precio del horno eléctrico para tratamientos es de \$ 3,000 con una vida útil de 25 años (ver, Fig. 2.10).

Se procedió a calcular el consumo energético y la depreciación del horno para tratamiento térmico, de manera similar como se desarrolló en el desglose del torno CNC.

Para la depreciación del horno se aproximó el uso a 3 años de vida útil, lo cual conlleva un 40% del valor inicial como valor de salvamento. Por lo tanto, la depreciación se obtuvo a partir de la Ec. 4.1, tal como se presenta a continuación.

$$D_p = \frac{\$ 3000 - (\$ 3000 * 40\%)}{25} = \$ 72.00$$

El valor de \$ 72.00 hace referencia a la depreciación anual del horno eléctrico, sin embargo, el tiempo de uso fue de 1 día ya que, para un solo lote de probetas, tardó 3 h en tratar térmicamente las probetas. Para las 42 probetas tratadas térmicamente, se atribuye un valor de **\$ 0.024** por probeta para la depreciación del horno eléctrico.

La potencia del equipo es de 4.5 kW, el tiempo de uso del equipo se divide en dos etapas, una etapa de precalentamiento que consta de 165 min y una etapa de mantenimiento a temperatura constante que consta de 30 min. El tiempo total en uso y operación para un lote de 42 probetas en el horno es de 180 min lo que equivale a 3 h.

El costo de consumo energético del horno *C. C. E.* se calcula como sigue.

$$C. C. E. \text{ Horno} = 4.5 \text{ kW} * 3 \text{ h} * \$ 0.14 \text{ kWh} = \$ 1.89$$

El valor de \$ 1.89 representa el costo para las 42 probetas tratadas térmicamente, pero para cada probeta el costo equivale a **\$ 0.045**.

Los materiales consumibles utilizados para el tratamiento térmico son el papel aluminio para cubrir un lote de 15 probetas (entre las 42 probetas en total) y colocarlas en la bandeja del horno eléctrico para evitar corrosión durante el recocido con un costo de \$ 3.25 pero de ese material solamente se usó una cuarta parte del total por lo que el costo para las 42 probetas es de \$ 0.81 y para cada probeta esto representa un costo de \$ 0.01; y 1 libra de alambre de amarre costando \$ 0.55 utilizando la cuarta parte de éste, sale un total para las 42 probetas de \$ 0.13 y por probeta esto equivale a \$ 0.003. El costo por probeta, para los materiales consumibles utilizados para el tratamiento térmico es de **\$ 0.01**.

Partiendo que el local consta con un área de 35 m², el área útil para el tratamiento térmico del local es aproximadamente 4 m², área suficiente para realizar el recocido de las probetas dentro del local. Para cada probeta, el tratamiento térmico, por el costo del local para el tiempo de 3 h del recocido de las 42 probetas, equivale a un costo de **\$ 0.01**.

Además, se tiene que agregar el costo del consumo eléctrico ya que, al trabajar en condiciones no favorables para la visibilidad, se necesita hacer uso de la luminosidad instalada en el local. El local utilizado es el Laboratorio de Tratamientos Térmicos de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, el cual tiene 8 tubos fluorescentes de luz blanca, de los cuales,

solo 2 tubos son necesarios para alumbrar el área de trabajo del horno eléctrico; además cada tubo consume 32 W, por consiguiente, la energía consumida es de 560 W/h o 0.56 kWh por cada tubo fluorescente; asumiendo que no se tienen cobro por demanda máxima entonces el total consumido es de 1.12 kWh; para cada probeta, el costo de los 2 tubos fluorescentes es de **\$ 0.07**.

Sumando el costo de la renta del local y el costo por consumo eléctrico de la luminosidad del laboratorio, el costo total del local entonces equivale a **\$ 0.08** por probeta tratada térmicamente.

Así mismo, se tiene que tomar en cuenta el costo del técnico, siendo esta la persona encargada de manipular el horno eléctrico de tratamientos térmicos y llevar el debido registro de las temperaturas y tiempos marcados por el horno eléctrico en el momento de llevar a cabo un tratamiento térmico.

Para el costo por mano de obra directa, un estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, como instructor de la cátedra de tratamientos térmicos, debido a los conocimientos adquiridos durante su etapa de formación, puede suplir la necesidad de un técnico encargado del Laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Esta persona, según la Ley Orgánica de la Universidad de El Salvador, es remunerada con \$ 300.00 mensuales. Se asume que debe cumplir con 100 min por día (tiempo que dura un laboratorio de una cátedra) con asesorías que tengan que ver con la materia, durante los 5 días de la semana. Las 3 h dedicadas para el tratamiento térmico de las 42 probetas equivalen a \$ 25.71, haciendo un total de \$ 0.61 por cada probeta tratada térmicamente. El costo de supervisión es el mismo valor adoptado para la supervisión del maquinado de las probetas y, para las 3 h de tiempo de tratamiento térmico, este costo por mano de obra indirecta equivale a \$ 0.58 por probeta tratada. El costo total por mano de obra, sumando el costo directo del instructor más el costo indirecto, del docente, es igual a **\$ 1.19** por probeta tratada térmicamente.

En la tabla 4.4 se presenta el detalle de costos para el tratamiento térmico de recocido de cada probeta de acero AISI 1020 ensayadas a fatiga al aire por flexión rotativa el cual se obtiene un total de **\$ 1.34**.

Tabla 4.4. Detalle de costos por tratamiento térmico de recocido de las probetas de acero AISI 1020 para ensayos de fatiga por flexión rotativa.

Tratamiento térmico de recocido por probeta	Costo por probeta, \$
Depreciación	0.02
Costo de mano de obra	1.19
Consumo energético	0.04
Consumibles	0.01
Costo del local	0.08
Costo total por probeta tratada térmicamente	1.34

4.4. COSTOS DE LIJADO Y PULIDO

Posterior al tratamiento térmico de recocido, se desarrolló un proceso de pulido el cual incluye costos por papel lijas de SiC desde la número 80 hasta la número 1200 costando \$ 0.75 cada pliego pero para el lijado de las 42 se utilizaron 3 pliegos de lija 80, 3 pliegos de lija 100, 3 pliegos de lija 150, 3 pliegos de lija 200, 3 pliegos de lija 300, 3 pliegos de lija 400, 3 pliegos de lija 500, 3 pliegos de lija 600, 3 pliegos de lija 800, 3 pliegos de lija 1000 y 3 pliegos de lija 1200, haciendo un total de \$ 24.75 para las 42 probetas pero para cada probeta lijada y pulida se obtiene un costo de **\$ 0.59**; también se utilizó aproximadamente 1 galón de agua potable para el lijado de las probetas, según la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados de El Salvador (ANDA), la lista de precios tarifarios para residenciales del 2016 (vigente hasta la fecha de este estudio) la tarifa mínima de 0 a 10 m³ .para acueductos es de \$ 2.29 y la tarifa para alcantarillado es de \$ 0.10, haciendo un total de \$ 2.39 la tarifa mensual de agua potable en El Salvador, pero para las 42 probetas lijadas y pulidas, el cual constó de 2 días, y se usó aproximadamente 1 galón (0.0037 m³), una probeta

representa un costo de \$ 0.0008, por lo que este costo, no incide significativamente en esta determinación de costos.

El costo del local, en el cual se encuentra el área de trabajo para el lijado y pulido de las probetas, se toma en cuenta para esta determinación de costos, el costo del local representa un valor de \$300. El local se utilizó 8 h al día por 5 días de la semana. Partiendo que el local consta con un área de 35 m², el área útil para el tratamiento térmico del local es aproximadamente 3 m², área suficiente para realizar el recocido de las probetas dentro del local. Para cada probeta, por el costo del local para el tiempo de 6 h del lijado y pulido de las 42 probetas, equivale a un costo de **\$ 0.02**.

Además, se tiene que agregar el costo del consumo eléctrico ya que, al trabajar en condiciones no favorables para la visibilidad, se necesita hacer uso de la luminosidad instalada en el local. Adoptando un local similar al que se utilizó en el proceso de tratamiento térmico con el mismo número de luminarias y haciendo uso del mismo número de tubos para iluminación del área de trabajo; para cada probeta, el costo de los 2 tubos fluorescentes es de **\$ 0.07**.

Sumando el costo de la renta del local y el costo por consumo eléctrico de la luminosidad, el costo total del local entonces equivale a **\$ 0.09**, por probeta lijada y pulida.

Así mismo, se tiene que tomar en cuenta el costo del técnico, siendo esta la persona encargada de lijar y pulir las probetas que ya fueron tratadas térmicamente.

Para el costo directo de la mano de obra se asume un estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, como instructor de la cátedra de Procesos de Fabricación, debido a los conocimientos adquiridos durante su etapa de formación, está capacitado para realizar un buen lijado para el mejor acabado superficial de las probetas. Esta persona, según la Ley Orgánica de la Universidad de El Salvador, es remunerada con \$ 300.00 mensuales. Se asume que debe cumplir con 105 min por día (tiempo que dura un laboratorio de una cátedra) con asesorías que tengan que ver con la materia, durante los 5 días de la semana. Las 6 h dedicadas para el lijado y pulido de las

42 probetas equivalen a \$ 51.42, haciendo un total de \$ 1.22 por cada probeta lijada y pulida. De manera indirecta, se asume el costo del supervisor, en este caso, el docente encargado de la cátedra de Procesos de Fabricación, para supervisión se adopta el mismo valor que los casos de supervisión anteriores, para las 6 h de tiempo del lijado y pulido de las probetas de acero, este costo por mano de obra indirecta equivale a \$ 1.16 por probeta. El costo total por mano de obra, sumando el costo directo del instructor más el costo indirecto, del docente, es igual a **\$ 2.38** por probeta tratada lijada y pulida.

En la Tabla 4.5 se presenta el detalle de costos por lijado y pulido por cada probeta de acero AISI 1020 ensayadas a fatiga al aire por flexión rotativa el cual se obtuvo un total de **\$ 3.06**.

Tabla 4.5. Detalle de costos por lijado y pulido de las probetas de acero AISI 1020 para ensayos de fatiga por flexión rotativa.

Lijado y pulido de las probetas	Costo por probeta, \$
Costo de mano de obra	2.38
Consumibles	0.59
Costo del local	0.09
Costo total de lijado y pulido por probeta	3.06

4.5. COSTOS POR ENSAYOS DE FATIGA

Para el desarrollo de los ensayos de fatiga, se cuenta con la máquina GUNT HAMBURG WP 140, ubicada en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador.

Los equipos, sea cual sea su fin, conllevan una pérdida de valor como consecuencia de su desgaste con el paso del tiempo, esta pérdida de valor se denomina, en términos de contabilidad, como depreciación. Esta depreciación se añadió al resultado que se obtiene del uso de la maquinaria.

Dentro de los costos que genera el uso de la máquina de fatiga, se asociaron los costos de mantenimiento preventivo y correctivo previo al desarrollo de los ensayos.

La máquina GUNT HAMBURG WP 140, para ensayos de fatiga por flexión rotativa, tiene un costo inicial de \$ 16,855 y una vida útil de 10 años.

Resulta calcular el consumo energético y la depreciación de la máquina de fatiga por flexión rotativa de manera similar como se desarrolló el procedimiento de cálculo del torno CNC y el horno para el tratamiento térmico.

Para la depreciación de la máquina de fatiga se sabe que se encuentra en el año 2 de vida útil, lo cual conlleva un 60% del valor inicial como valor de salvamento. De acuerdo a esto, la depreciación se obtuvo con la Ec 4.1 tal como se presenta a continuación.

$$D_p = \frac{\$ 16855 - (\$ 16855 * 60\%)}{10} = \$ 1,584.40$$

Los \$ 1,584.40 son la depreciación anual de la máquina de fatiga; son 52 semanas al año, dando un total de \$ 30.47 por semana, esto es la depreciación semanal de la máquina, el cual, el tiempo de uso que se empleó de la máquina para ensayar las 42 probetas fue aproximadamente de 3 semanas. Como ya se sabe, se han ensayado 42 probetas, 12 por cada radio de acuerdo, añadiendo 2 probetas a cada radio de lo cual se atribuye un valor de **\$ 2.17** por probeta.

La potencia del equipo es de 0.75 kW según el fabricante. El tiempo promedio por ensayo de probeta ronda los 45 min (0.75 h). El costo de consumo energético de la máquina de ensayos de fatiga por flexión rotativa se calcula como sigue:

$$C. C. E. \text{ Máquina} = 0.75 \text{ kW} * 0.75 \text{ h} * \$ 0.14 \text{ kWh} = \$ 0.08$$

$$\text{Costo de consumo energético máquina de ensayos por probeta} = \$ \mathbf{0.08}$$

Dentro de los costos de uso de la máquina de ensayos de fatiga, se deben agregar los costos de mantenimiento preventivo y correctivo que se han hecho a la máquina antes de realizar los ensayos de fatiga ya que antes de los ensayos para este estudio, hubo otro trabajo que también ensayaron probetas por lo que el mantenimiento es necesario para un buen resultado. Los mantenimientos se desglosan de la siguiente manera:

Mantenimiento preventivo: motor eléctrico, revisión del estado de los bobinados y limpieza de los mismos por un costo de \$ 80.00. Teniendo el costo por probeta para el mantenimiento del motor de **\$ 1.90**.

Mantenimiento correctivo: máquina de ensayos, calzado y rectificado de eje transmisor de potencia del motor a la probeta por un monto de \$ 43.00, el cual, para cada probeta esto tiene un costo de \$ 1.02; sustitución de rodamientos para el eje antes mencionado con valor de \$ 20.00 por rodamiento siendo dos los rodamientos sustituidos, teniendo un costo por probeta ensayada de \$ 0.95. Al hacer la suma de los costos por el mantenimiento correctivo da un total de **\$ 1.97** por probeta ensayada.

El costo del mantenimiento total, tanto el preventivo como el correctivo que se le hizo a la máquina de ensayos de fatiga por probeta es de **\$ 3.87**.

El costo del local, en el cual se encuentra el área de trabajo para los ensayos de fatiga de las probetas de acero AISI 1020, se toma en cuenta para esta determinación de costos ya que el alquiler del espacio de un local en la zona central del municipio de San Salvador, del departamento de San Salvador, varía entre \$ 300.00 a \$ 500.00, suponiendo un local con área de 35 m², el valor de alquiler equivale aproximadamente a \$ 300.00. El local se utiliza 8 h al día por 5 días de la semana. Partiendo que el local consta con un área de 35 m², el área útil para el ensayo de fatiga es aproximadamente 4 m², área suficiente para realizar el ensayo de las probetas dentro del local. Para cada probeta, el costo del local para un tiempo de ensayo promedio por probeta de 0.75 h (31.5 h para las 42 probetas), equivale a un costo de **\$ 0.16**.

Además, se tiene que agregar el costo del consumo eléctrico ya que, al trabajar en condiciones no favorables para la visibilidad, se necesita hacer uso

de la luminosidad instalada en el local. El local tiene 8 tubos fluorescentes de luz blanca, de los cuales, solo 2 tubos son necesarios para alumbrar el área de trabajo para los ensayos de las probetas; además cada tubo consume 32 W, por consiguiente, la energía consumida es de 560 W/h o 0.56 kWh por cada tubo fluorescente; asumiendo que no se tiene cobro por demanda máxima entonces el total consumido es de 1.12 kWh; para cada probeta, el costo de los 2 tubos fluorescentes es de **\$ 0.07**.

Sumando el costo de la renta del local y el costo por consumo eléctrico de la luminosidad, el costo total del local entonces equivale a **\$ 0.23** por probeta ensayada a fatiga.

Finalmente, se tiene que considerar el costo por mano de obra directo del laboratorista. En este caso el laboratorista es la persona encargada de realizar los ensayos de fatiga por flexión rotativa. Este dato depende de varios factores como por ejemplo la preparación académica, la experiencia, entre otros. Un estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, quien, en base a su experiencia laboral y académica está capacitado para realizar los ensayos. Esta persona devenga un promedio de \$ 600.00 mensuales. En promedio, las probetas se ensayaron en ~31.5 h, para un total de 42 probetas. Esto se traduce en un costo por laboratorista de \$ 2.81 por probeta ensayada a fatiga. De manera indirecta, se asume el costo del supervisor, en este caso, el docente encargado del laboratorio de ensayos mecánicos, quien se asume que devenga un salario de mensual de \$ 1,200.00, quien debe cumplir un total de 40 h semanales y, para las 31.5 h de tiempo del ensayo de fatiga de las probetas de acero, este costo por mano de obra indirecta equivale a \$ 5.63 por probeta. El costo total por mano de obra, sumando el costo directo del laboratorista más el costo indirecto, del supervisor, es igual a **\$ 8.44** por probeta tratada lijada y pulida.

En la Tabla 4.6 se presenta el detalle del costo por probeta de acero AISI 1020 para ensayos de fatiga al aire el cual se obtuvo un total de **\$ 14.79**.

Tabla 4.6. Detalle de costos por ensayo de fatiga al aire por flexión rotativa de las probetas de acero AISI 1020.

Ensayos de fatiga por flexión rotativa	Costo por probeta, \$
Depreciación	2.17
Costo de mano de obra	8.44
Consumo energético	0.08
Mantenimiento	3.87
Costo del local	0.23
Costo total de ensayos de fatiga por probeta	14.79

4.6. RESUMEN DE LOS COSTOS DE PREPARACIÓN Y ENSAYOS DE LAS PROBETAS

Para tener una mejor representación de todos los costos implicados en el desarrollo de este estudio, se presenta en la Tabla 4.2, la cual detalla de manera ordenada y concisa los costos por material consumible, procesos de maquinado, proceso de tratamiento térmico post maquinado para alivio de esfuerzos residuales y desarrollo de ensayos.

Tabla 4.7. Resumen del costo por probeta de acero AISI 1020 ensayada a fatiga por flexión rotativa.

Proceso para ensayos de fatiga de una probeta de acero AISI 1020	Costo, \$
Materia prima acero AISI 1020	2.00
Maquinado de probetas en torno CNC	7.91
Tratamiento térmico de recocido de alivio de esfuerzos residuales	1.34
Lijado y pulido de probetas	3.06
Ensayos de fatiga	14.79
Total/Probeta	29.10

El costo total por probeta de acero AISI 1020 ensayada a fatiga al aire por flexión rotativa ha sido de **\$ 29.10**.

CONCLUSIONES

Por medio de los datos obtenidos de los ensayos de fatiga al aire por flexión rotativa para probetas de acero AISI 1020 se puede concluir lo siguiente:

- ✓ Al tener menor radio de acuerdo, para este estudio el radio de 8 mm, se ha demostrado experimentalmente que se incrementa el concentrador de esfuerzos en un 5% al ser comparadas con las probetas con radio de acuerdo de 16 mm y 40 mm; sin embargo, para las probetas de radio de acuerdo de 16 mm y 40 mm no existe una diferencia considerable por lo que se puede concluir que no se tiene incremento a la resistencia a la fatiga al aire a medida que se incrementa el radio de acuerdo tal y como se observa en la Fig. 3.4.
- ✓ Al obtener las ecuaciones de resistencia a la fatiga al aire por flexión rotativa se consideran confiables para investigación y desarrollo de componentes y probetas, lo cual se realizó utilizando la norma de la ASTM designación E 739 obtenida mediante la reproducibilidad y justificar el número de probetas ensayadas. se logró considerar como un procedimiento exitoso debido a que estas ecuaciones presentaron la tendencia esperada a pesar de que se analizaron los resultados sólo para dos niveles de esfuerzo y 12 probetas ensayadas para cada radio de acuerdo (ver, Fig. 3.4).
- ✓ El procedimiento de determinación de costos para los ensayos de fatiga realizado en este trabajo de graduación se considera que es satisfactorio. Así, es importante la determinación de costos ya que puede servir de base para proyectos a futuro que puede realizar la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. México D.F: México Pearson Educación.
- [2] ASM HANDBOOK (1996). *Fatigue and Fracture*, V 19. United States of América.
- [3] Avner, S. (1988). *Introducción a la Metalurgia Física*. 2° Edición. Naucalpan de Juárez: McGRAW HILL.
- [4] Askeland, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. 3° edición. México: Thomson Editores.
- [5] Dieter, G. (1986). *Metalurgia Mecánica*, Tercera edición. Estados Unidos de América: Mc Graw-Hill.
- [6] ASM HANDBOOK (1987), *Fractography*, V 12. United States of América.
- [7] Budynas, R., & Nisbett, K. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, Octava Edición. México D.F: Mc Graw-Hill.
- [8] Pimentel A.P. (2005). *Estudio de fatiga y fatiga-corrosión de un acero SAE 4140 recubierto con una aleación de Ni-Co-B*.
- [9] Mott, R.L. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas*, Cuarta Edición. México D.F: Pearson educación.
- [10] Piovan, M.T. (2014). *Esfuerzos y Deformaciones*. Buenos Aires: Universidad Técnica Nacional.

- [11] Forrest, P. (1962). *Fatiga de los Metales*. Bilbao: EDICIONES URMO.
- [12] Shigley, J. E. (1990). *Diseño en Ingeniería Mecánica*. México: Mc Graw-Hill.
- [13] Espinel, C. (2014) *Análisis metalográfico de los aceros 1020 y 1045*. Norte de Santander: UNIPAMPLONA.
- [14] Basquin, O.H. (1910) The exponential law of endurance tests. *Proc ASTM*, 10 (II) 625.
- [15] ASTM Designation E 739-91(Reapproved 2004): *Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data*.
- [16] Norton, R., L. (2011). *Diseño de Maquinas, un Enfoque Integrado*, Cuarta Edición. México: Pearson Educación.
- [17] Baca, G. U. (2010). *Evaluación de proyectos*, Sexta edición. México: Mc Graw-Hill.