UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

DESARROLLO DE UNA METODOLOGIA PARA PRUEBAS DE EROSION

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA

CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA

ALVARO MANUEL TREVIÑO ACEVEDO

CIUDAD UNIVERSITARIA JUNIO DEL 2004

JUN

TM
Z5853
.M2
FIME
2004
T74

DESARROLLO DE UNA METODOLOGIA PARA PRUEBAS DE EROSION

A.M.T.A.

1020150052

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

DESARROLLO DE UNA METODOLOGIA PARA PRUEBAS DE EROSION

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA

CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA

ALVARO MANUEL TREVIÑO ACEVEDO

CIUDAD UNIVERSITARIA JUNIO DEL 2004

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA PRUEBAS DE EROSIÓN

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA

ALVARO MANUEL TREVIÑO ACEVEDO

CIUDAD UNIVERSITARIA **JUNIO DE 2004**

989717

TM
Z5853
.M2
FIME
2004
.T74

FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA PRUEBAS DE EROSIÓN

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA

ALVARO MANUEL TREVIÑO ACEVEDO

CIUDAD UNIVERSITARIA **JUNIO DE 2004**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Desarrollo de una metodología para pruebas de erosión", realizada por el alumno Alvaro Manuel Treviño Acevedo, matrícula 906049, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis

Asesor
Dr. Alberto Javier Pérez Unzueta

Coasesor
Dr. Rafael David Mercado Solís

Coasesor
Dr. Sergio Haro Rodríguez

Vo. Bo.
Dr. Guadalupe Alan Castillo
División de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, N. L. Junio de 2004

DEDICATORIA

A Dios

A mi Padres:

Teodulo Javier Treviño Sáenz
Martha Elva Acevedo Valencia

A mis Hermanos:

Javier Alberto
Oscar Gerardo
Juan Carlos

A mi Novia:
Citlali Reyna Aguirre

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme ser y estar.

Al Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales (PDIM) de la FIME UANL por aceptarme estos dos años.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada.

Al Doctor Alberto Javier Pérez Unzueta, por permitirme aprender y trabajar con el, en la solución de diferentes problemas industriales, en este proyecto y la forma de apreciar las situaciones que se presentan en la vida. Gracias por sus enseñanzas, su amistad y su tutoría, pero sobre todo su paciencia. Me ha servido de mucho trabajar con usted.

Al Doctor Colas por su apoyo y amistad pero sobre todo por su disponibilidad.

Al Doctor Mercado por ser mi amigo, "le debo el diseño de la máquina de laminación... ahh y un caldito tlalpeño".

Al Doctor Sergio Haro por recibirme en Zacatecas y apoyarme en la revisión de esta tesis, muchas gracias por todas sus atenciones y consejos.

A todos los Doctores del PDIM por sus enseñanzas y por ser excelentes en sus áreas de investigación.

A los Doctores de Nemak Salvador Valtierra, Abraham Velasco, y José Talamantes por preocuparse, facilitando mi estancia en la compañía así como toda la raza: Mike, Beto, Efrén, Andrés, Jacob, los dos Alejandros, Rodrigo, Guamuchil.

A los futuros Doctores:

Eduardo Rodríguez, muchas gracias por toda tu gran y valiosa ayuda. Estoy totalmente agradecido. Valieron la pena tantas discusiones ¿quieres otra maquinita viejo? Primero paga los tejuinos ahhhhh oye... y la televisión?

Julián Rodríguez gracias por todos los consejos que aunque le hacia como que te tiraba a león si me ayudaron y mucho. AAhhhh y ya termina por que se te acaba la beca maestro.

Efrén gracias por tu compañía aunque la raza diga que eres sucio... "eres mas limpio y puro que la bata de un carnicero". Aaahh y a ver cuando me regalas la batería de 19 placas.

A mi gran amigo Chava gracias por apoyarme en este proyecto. "Hulk" no le grites a tu hermanito porque te vas a poner verde fosforescente ("cuenta saldada" jajaja).

A mis compañeros de generación Adela, Salvador y Nelson por que fuimos poquitos pero recuerden que de lo bueno poco.

A toda la raza de servicio social que me apoyo en este proyecto Víctor Martínez, Laura Esparza, Judith y todos los que falten.

A la raza de la cueva: Lalo, Luis, Queque, Efrén, Jhona, Marco, Niño, Leo, Nieto, Roberto. A las Canadienses Mony, Maritrini, Angelina. Al Moya, Ere y Nancy, A los Dalton: Oscar, Orlando, Luis, Miguel, Jorge, a la pequeñita Yury y su palomilla integrada por Juanitus y Lily. A la pareja mas despiadada Rodrigo y Mayra a oye y nos vemos en Marzo. A Dianita y Erin a Jimy, Fer, Chicho, Casta y Eva, a los del IAESTE Sandia, Eva, Leandro, y Anita después te caigo en Croacia, al verano científico Tabasco, Mexicali, Tamaulipas, Chihuahua, a Claudia, la Dra. Dorix, Don Rodolfo por su disponibilidad, a la señora Maricela (prometo ya no asustarla) Y Anita y su futuro babie y a todos los que me falten muchas gracias por este tiempo que pase muy bien con todos ustedes.

A mi amiga Raquel Góngora Hernández por preocuparse por mi, todo el tiempo.

A mis hermanitas Dione (por el equipo de computo), Teresita (gracias por el Elmo) y Gemma (pues que te digo ahh ya se arreglale los frenos al vocho).

A Don Juan por prestarme las maquinas del laboratorio de maquinados. A Alejandro Torres por los recubrimientos. A la Universidad de Venezuela especialmente a la Dra Staia, a Lourdes de Eurocon. A Eliécer Varela de Nibco de México. A Felicia de Mercedes Benz Alabama, A Agustín Alcalá y Alberto Juangorena de KS Industrial.

A La raza de dinámica en especial al Ingeniero Villalobos por prestarme el equipo para realizar algunas mediciones.

A la señora Lulu por ayudarme con las cartas de titulación.

Y a ti estrellita por ser mi mejor amiga por escucharme, quererme y confiar en mi, Citlali te agradezco todos esos jalones de oreja que me diste.

"GRACIAS A TODOS POR TODO"

PRÓLOGO

El avance científico y tecnológico logrado en los últimos años ha puesto una gran demanda en la respuesta de los materiales ingenieriles a las cada vez más rigurosas condiciones de trabajo de componentes mecánicos. Un ejemplo clásico es la tendencia a reducir el peso de los automóviles para reducir el consumo del combustible.

El uso actual de aleaciones de aluminio para monobloques y cabezas de los motores de combustión interna ha sido un gran avance en esta búsqueda de disminuir el peso. Los monoboloques y las cabezas son piezas de geometría muy complicada obtenidos por procesos de fundición, donde las cavidades internas son formadas por medio de corazones. Los corazones son fabricados en cajas o moldes por el proceso de soplado. Uno de los principales problemas en la manufactura de los corazones es la erosión ocasionada por el impacto de las partículas de arena en las paredes de los moldes. Una caja erosionada, producirá corazones con variaciones dimensionales que a su vez afectaran las dimensiones de los monobloques o cabezas, poniendo en peligro la integridad y buen funcionamiento de un motor.

Varias soluciones empíricas al problema del desgaste han sido puestas exitosamente en práctica. El valor del presente trabajo es el inicio de una metodología científica para determinar los mecanismos de erosión encontrados en las cajas de corazones. Este trabajo se encuentra enmarcado en un proyecto de largo alcance donde participan las empresas NEMAK (México), MECCANICA BASSI (Italia), ASHLAND CHEMICAL (USA) y la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León. En dicho proyecto, dos candidatos a Doctor realizan su trabajo de investigación y tesis doctorales en determinar los mecanismos básicos de erosión y los diferentes parámetros operacionales que influyen en la vida útil de los moldes. Esta tesis de maestría, se centra en el diseño y construcción de una máquina tribológica para realizar las pruebas de erosión que cubran las condiciones presentes en la operación industrial, pero que también permite realizar estudios básicos del fenómeno de erosión.

Es grato observar que jóvenes científicos, como es el caso del autor del presente trabajo, dirigen su creatividad y talento en la solución de problemas tecnológicos a nivel y proyección mundial.

Dr. Alberto Pérez Unzueta.

San Nicolás de los Garza, Junio 2004

SÍNTESIS

La empresa Nemak, S. A de C. V., líder mundial en desarrollo tecnológico y fabricación de cabezas y monobloques, en conjunto con MECCANICA BASSI fabricante de herramentales con sede en Italia y la U.A.N.L F.I.M.E Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales, han iniciado un estudio sobre el comportamiento tribológico de los herramentales involucrados en la producción de las cajas de corazones.

Este estudio cubre el desarrollo de la metodología para reproducir el desgaste erosivo encontrado en las cajas de corazones a nivel laboratorio para su estudio analítico, se realizó un estudio de las variables que se involucran en el proceso de moldeo, para posteriormente realizar el diseño y construcción de un equipo prototipo que permitió realizar pruebas preeliminares en la búsqueda de las condiciones controladas requeridas.

Después del prototipo y análisis de su funcionamiento se diseño y construyó un sistema de erosión para realizar pruebas a nivel laboratorio cuyos resultados permitieran su aplicación a nivel industrial.

El material a analizar fue el acero utilizado en las cajas de corazón del proceso de moldeo de caja fría; acero grado herramienta H-13 en condiciones de recocido y templado y revenido con durezas de 30, 40, 55 HRC para un intervalo de ángulos de impacto. Posteriormente se hizo un diseño de experimentos con la finalidad de aproximar las condiciones del proceso de moldeo en cajas de corazones al equipo diseñado y construido.

Finalmente se obtuvieron las curvas de erosión del acero H-13 y fueron discutidos sus resultados. Obteniendo beneficios tanto industriales como de investigación.

INDICE

Página

DEDICATORIA.....i

AGRADECIMIENTOS.....ii

PRÓLOGO.....iv

SÍNTESIS v

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción..... 1

CAPÍTULO 2 ACEROS GRADO HERRAMIENTA

2.1 Introducción..... 5

2.2 Clasificación. 6

2.3 Selección y propiedades. 7

2.4 Aceros para trabajo en caliente grupo H. 11

2.5 Aceros para trabajo en caliente al cromo. 12

2.6 Acero Grado Herramienta H13..... 13

2.7 Tratamientos térmicos del acero H-13. 14

CAPÍTULO 3 DESGASTE

3.1 Introducción..... 18

3.2 Mecanismos de desgaste..... 19

3.2.1 Desgaste Abrasivo..... 22

3.2.2 Desgaste Adhesivo. 23

3.2.3 Desgaste Corrosivo. 24

3.2.4 Desgaste Erosivo..... 25

3.2.5 Desgaste por fatiga..... 26

3.2.6 Desgaste por fretting. 26

3.2.7 Desgaste Oxidativo..... 27

3.3 Aplicación útil del desgaste. 28

3.4 Categorías y condiciones de pruebas tribológicas. 30

CAPÍTULO 4 EROSIÓN

4.1. Introducción..... 33
4.2 Desgaste erosivo por partículas sólidas..... 34
4.3 Propiedades de la partícula..... 35
4.3.1 Dureza..... 35
4.3.2 Forma..... 38
4.3.3 Tamaño de la partícula..... 40
4.4 Desgaste erosivo por deformación plástica..... 42
4.4.1 Mecanismo..... 42
4.4.2 Ángulo de impacto..... 44
4.4.3 Daños causados en ángulos oblicuos..... 46
4.4.4 Forma de la partícula y ángulo de impacto..... 47
4.4.5 La dureza de la superficie..... 48
4.5 Desgaste erosivo por fractura frágil..... 50
4.5.1 Mecanismo..... 50
4.6 Transición dúctil-frágil..... 53
4.6.1 La dureza de la superficie..... 53
4.6.2 Energía Cinética..... 54

CAPÍTULO 5 MOLDEO

5.1 Introducción..... 56
5.2 Moldeo de Arena..... 57
5.3 Control de la arena en el proceso de caja fría..... 58
5.3.1 Forma de la partícula..... 59
5.3.2 Granulometría GFN (Grain Fíneness Number)..... 60
5.3.3 Temperatura de la arena..... 61
5.3.4 Humedad de la arena..... 61
5.3.5 PH y Demanda de ácido..... 62
5.4 Proceso de Caja Fría..... 63
5.4.1 Etapa de soplado..... 63
5.4.1.1 Adherencia del corazón hacia la superficie del herramental... 64
5.4.1.2 El desgaste erosivo en las cajas de corazones..... 65

5.5 Estudio de la velocidad de impacto en la caja de corazones. 66
5.6 Estudio de las presiones en el sistema de caja fría. 67

CAPÍTULO 6 FUNDAMENTOS DE DISEÑO
6.1 Introducción..... 72
6.2 Tipos de diseño..... 73
6.3 Sistemas Técnicos. 74
6.4 Metodología para el diseño de maquinaria. 75
6.5 Equipos de pruebas de erosión..... 77
6.6 Principales variables en el desarrollo del sistema por boquilla. 79
6.6.1 Relación longitud – Diámetro boquilla. 79
6.6.2 Rugosidad de la boquilla 81
6.4.3 Huellas y ángulo de impacto..... 81
6.4.4 La velocidad de la partícula. 83

CAPÍTULO 7 METODOLOGÍA DE DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN
7.1 Introducción..... 85
7.2 Condiciones de prueba. 86
7.3 Máquina Prototipo. 87
7.3.1 Exploración. 88
7.3.2 Ajuste de variables. 90
7.4 Máquina de pruebas. 96
7.4.1 Subsistema cámaras de erosión. 96
7.4.2 Subsistema Sujeción. 98
7.4.3 Subsistema cabina. 100
7.4.4 Subsistema velocidad de la partícula. 101
7.5 Metodología de las pruebas de erosión en el acero H13. 105
7.5.1 Caracterización de la partícula erosiva..... 105
7.5.2 Caracterización del acero a ensayar. 107
7.5.3 Evaluación del del fluido y alimentación de la partícula.....108
7.5.4 Pruebas en el acero grado herramienta H-13..... 110

CAPÍTULO 8 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.
8.1 Introducción..... 113
8.2 Máquina Prototipo etapa exploración..... 114
8.3 Máquina Prototipo, etapa ajuste de variables. 118
8.3.1 Selección de las dimensiones de probeta. 122
8.3.2 Comportamiento del equipo prototipo etapa 2..... 122
8.4 Máquina de pruebas. 124
8.4.1 Subsistema de erosión. 125
8.4.2 Subsistema sujeción..... 127
8.4.3 Subsistema Cabina..... 129
8.4.4 Subsistema Velocidad (método doble disco)..... 130
8.5 Caracterización del sistema de erosión en el H13. 135
8.5.1 Resultados de la caracterización de las partículas erosivas..... 135
8.5.2 Resultados de caracterización del material a impactar. 138
8.5.3 Resultado de la evaluación de las condiciones de impacto..... 140
8.5.4 Resultados del desgaste erosivo en el acero a H13..... 141

CAPÍTULO 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.
8.1 Diseño del equipo. 147
8.2 Pruebas de erosión. 148
8.3 Recomendaciones.....149
BIBLIOGRAFÍA 150
LISTA DE FIGURAS.....153
LISTA DE TABLAS.....158
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO 160