

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



PROPIEDADES A IMPACTOS DE ACEROS  
MICROALEADOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN INGENIERIA DE MATERIALES

PRESENTA:  
JUAN ANTONIO FUENTES MONTEMAYOR

CD. UNIVERSITARIA

FEBRERO DE 2003

TD  
Z5853  
.M2  
FIME  
2003  
.F8

TESIS

2003

PROPIEDADES A IMPACTOS DE ACEROS  
MICROALFADOS

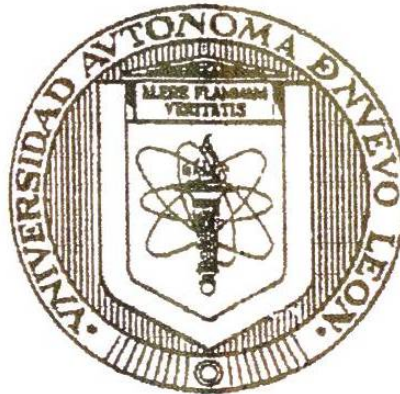


1020148615

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



PROPIEDADES A IMPACTO DE ACEROS  
MICROALEADOS

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN INGENIERIA DE MATERIALES

P R E S E N T A

JUAN ANTONIO FUENTES MONTEMAYOR

CD. UNIVERSITARIA.

NOVIEMBRE DEL 2002

9 5 2 4

TD

'

1

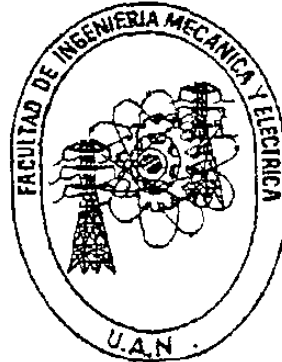
200  
.F



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON.**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO.



**PROPIEDADES A IMPACTO DE ACEROS  
MICROALEADOS.**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN INGENIERIA DE MATERIALES

P R E S E N T A

JUAN ANTONIO FUENTES MONTEMAYOR.

UNIVERSITARIA.

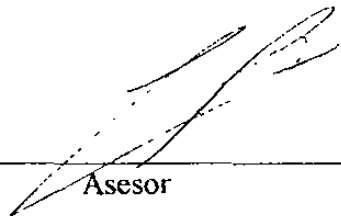
NOVIEMBRE DEL 2002

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON.  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

---

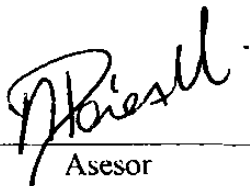
Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Propiedades a Impacto de Aceros Microaleados", realizada por el M. C. Juan Antonio Fuentes Montemayor , sea aceptada para su defensa como opción al grado de Doctor en Ingeniería de Materiales.

El Comité de Tesis



Asesor

Dr. Rafael Colás Ortiz



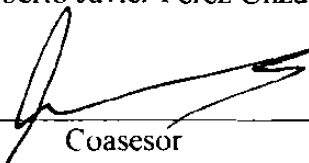
Asesor

Dr. Alberto Javier Perez Unzueta



Coasesor.

Dr. Carlos J. Lizcano Zulaica



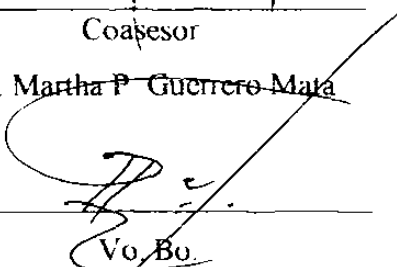
Coasesor

Dr. Eduardo Valdés Covarrubias



Coasesor

Dra. Martha P. Guerrero Mata



Vo. Bu.

Dr. G. Alan Castillo Rodriguez

División de Estudios de Postgrado

## DEDICATORIA.

CON MUCHO ORGULLO Y SATISFACCION DEDICO ESTE TRABAJO DE INVESTIGACION A LAS SIGUIENTES PERSONAS:

- \* A MI ESPOSA LUZ MARIA ORTIZ VALDES Y A MI HIJO LUIS ALBERTO FUENTES ORTIZ
- \* A MIS PADRES, QUE EN PAZ DESCANSEN,
  - + GUADALUPE ESPERANZA MONTEMAYOR VAZQUEZ
  - + JUAN ANTONIO FUENTES DE LA FUENTE.
- \* A MIS ABUELOS, QUE EN PAZ DESCANSEN,
  - + LORETO MONTEMAYOR MONTES DE OCA,
  - + FELICITAS VAZQUEZ AVILES,
  - + MARIA DE LA FUENTE JUAREZ,
  - + FRANCISCO FUENTES DE LOS SANTOS.
- \* A TODOS MIS HERMANOS,  
MAURO, AGRIPINA, GRACIELA, ROSA MARIA, OLGA ALICIA,  
HILDA BERTA Y ENRIQUE ADALBERTO.
- \* A NADADORES, COAHUILA, PUEBLO DONDE TODOS NACIMOS,  
MIS ABUELOS, MIS PADRES Y TODOS MIS HERMANOS.
- \* A LA FACULTAD DE METALURGIA (U. A. DE C.) DE MONCLOVA,  
COAH. LA CUAL FUNDE EN 1981 Y DE LA CUAL FUI SU PRIMER  
DIRECTOR, Y QUE ALLI ESTA, CRECIENDO POCO A POCO.



## **AGRADECIMIENTOS.**

EL DESARROLLO DE ESTA INVESTIGACION Y DE MIS ESTUDIOS DE DOCTORADO FUERON POSIBLES GRACIAS AL APOYO DE LAS SIGUIENTES PERSONAS, A QUIENES LES EXTIENDO MI MAS PROFUNDO AGRADECIMIENTO.

\* A FUNCIONARIOS DE LA U. A. DE C. POR EL GRAN APOYO QUE SIEMPRE ME BRINDARON:

- ING. JESUS OCHOA GALINDO, RECTOR.
- LIC. MARIA DEL CARMEN RUIZ ESPARZA Y LIC. AURORA BUSTILLOS GARFIAS.
- A LAS LICS. LAURA SANTOS Y ERIKA RODRIGUEZ, ETC.

\* A LA SEP QUIEN A TRAVES DEL PROGRAMA PROMEP ME PROPORCIONÓ LOS MEDIOS ECONOMICOS NECESARIOS.

\* A MIS COMPAÑEROS MAESTROS DE LA FACULTAD DE METALURGIA.

\* A AHMSA POR PERMITIRME LOS MATERIALES Y EQUIPOS DE LABORATORIO NECESARIOS, SOBRE TODO AL ING. EDUARDO VILLANUEVA Y A LA ING. SONIA GONZALEZ RAMIREZ.

\* A MIS ASESORES DE TESIS, DR. ALBERTO J. PEREZ UNZUETA, DR. RAFAEL COLAS ORTIZ, DRA. MARTHA PATRICIA GUERRERO MATA, DR. ALAN CASTILLO, DR. EDUARDO VALDÉS Y AL DR. CARLOS LIZCANO, POR SU COMPRESION Y APOYO.

\* A MIS MAESTROS Y COMPAÑEROS DEL DIMAT.

**A TODOS ELLOS MI MAS PROFUNDO AGRADECIMIENTO.**

# I N D I C E

<u>Contenido .</u>	<u>Página</u>
<b>DEDICATORIA</b>	i
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	ii
<b>PROLOGO</b>	1
<b>CAPITULO 1 SINTESIS</b>	4
<b>CAPITULO 2 INTRODUCCIÓN</b>	6
<b>CAPITULO 3 ANTECEDENTES HISTORICOS</b>	10
3 1 Aceros de alta resistencia y baja aleación	11
3 2 Aceros microaleados	12
3 3 Los primeros desarrollos	13
3 4 Empleo del niobio	16
3 5 Empleo del titanio	17
3 6 Primeras correlaciones	18
3 7 Metalurgia física de los aceros microaleados	21
3 8 Naturaleza de los precipitados	27
3 9 Laminación controlada	27
3 10 Aceros con perlita reducida	28
3 11 Inclusiones no-metálicas	29
3 12 Modificación de inclusiones (globulización)	30
3 13 Aceros de doble fase	30
3.14 Microestructuras bainíticas	31
<b>CAPITULO 4: NATURALEZA DE LOS ACEROS MICROALEADOS</b>	<b>33</b>
4 1 Soldabilidad de los aceros microaleados	38
4 2 Control de inclusiones no-metálicas	38
4 3 Aceros TMCP	42
4 4 Acero Limpio	42

<b>Contenido</b>	<b>Página.</b>
4 5 Globulizacion de las inclusiones	44
4 6 Efecto del azufre, fósforo, oxígeno y nitrógeno	45
4 7 Efecto del fósforo	46
4 8 Efecto del nitrógeno	48
4 9 Segregaciones	50
4 10 Efecto de las segregaciones sobre las propiedades a impacto	52
4 11 Resumen del capítulo 4	53
<b>CAPITULO 5. TERMODINAMICA DE LOS ACEROS MICROALEADOS</b>	<b>54</b>
5 1 Segregación de los microaleantes	57
5.2 Acondicionamiento de la austenita	57
5 3 Composición química de la austenita	59
5 4. Importancia de la precipitación	60
5 5. Importancia de Sv en el refinamiento de grano de la ferrita	61
5 6 Procedimientos para obtener Sv grandes	62
5 7 Influencia de los elementos microaleantes	67
5 8 Composición de la austenita	70
5 9 Temperaturas de transformación de la austenita. Ar <sub>3</sub> y Bs	72
5 10 Precipitación en la austenita	74
5 11 Descripción de los precipitados	74
5 12 Productos de solubilidad (K)	75
5 13. Métodos para determinar K	78
5.14 Gráfica de productos de solubilidad	79
5 15. Efecto de otros elementos en la precipitación	81
5.16 Efecto del tamaño de partícula sobre K	81
5.17 Grietas en planchones de colada continua	82
5 18 Efecto de la cedula de laminación sobre la precipitación	83
5 19 Efecto del carbono	84
5 20. Efecto del manganeso y del silicio	85
5.21 Precipitados y reacciones metalúrgicas	86
5.22 Temperatura de crecimiento de grano	88
5.23 Temperatura de no-recristalización, (T <sub>nr</sub> )	89
<b>CAPITULO 6 MECANISMOS DE REFORZAMIENTO EN ACEROS MICROALEADOS.</b>	<b>99</b>
6 1 Mecanismos de reforzamiento de metales	100
6 2 Soluciones sólidas	101

<b>Contenido</b>	<b>Página.</b>
<b>CAPITULO 10 DISCUSION DE RESULTADOS.</b>	186
10.1 Resultados de pruebas de tension	186
10.2 Resultados de prueba de impacto	189
<b>CAPITULO 11: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES           PARA TRABAJO FUTURO</b>	191
11.1 Conclusiones	191
11.2 Recomendaciones para trabajo futuro	192
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	194
<b>LISTA DE TABLAS.</b>	206
<b>LISTA DE FIGURAS.</b>	209

---

---

## PROLOGO

Los aceros microaleados comenzaron a desarrollarse desde los años de 1950. Su objetivo era aumentar la resistencia mecánica de los aceros pero disminuyendo el contenido de carbono. La necesidad de disminuir el carbono estriba en que a mayores contenidos de carbono el acero es menos soldable, es decir entre mayor sea el carbono en el acero, la soldadura de estos aceros presenta mayor número de microgrietas con lo cual aumenta la posibilidad de fracturas, sobre todo en los gasoductos en los cuales los esfuerzos de tensión producidos por la presión interna del gas puede hacer que dichas microgrietas se propagen lentamente hasta que repentinamente produzcan la fractura total del recipiente produciendo explosión, con el consiguiente peligro para las vidas de los trabajadores y destrucción de equipos, etc

Por esta razón es que se requiere disminuir el carbono lo más posible, pues si bien al aumentar el carbono aumenta el límite elástico, también se tiene que disminuye la ductilidad del acero, lo cual se refleja en 2 cosas.

- 1 Disminuye la soldabilidad de los aceros, entendiéndose por soldabilidad la habilidad que tienen los aceros para ser unidos mediante soldadura eléctrica sin que agrieten o fracturen
- 2 Disminuyen las propiedades a impacto es decir que disminuye la energía máxima absorbida y aumenta la temperatura de transición, lo cual es muy perjudicial para gasoductos y oleoductos

El disminuir el carbón para aumentar la soldabilidad y formabilidad de los aceros ha llevado al diseño de aceros con extrabajo carbón, los cuales son aquellos con contenidos menores de 0.02%. Pero con estos bajos carbonos disminuye mucho el límite de fluencia lo cual hace necesario que de alguna forma se aumente dicho valor. Las formas de hacer esto se conocen como mecanismos de reforzamiento y los aplicables son el refinamiento de grano, así como la precipitación de pequeñas partículas de terceras fases que ayuden a reforzar el acero, es decir a aumentar su límite elástico pero que a la vez aumenten su soldabilidad. Esto se logra mediante 2 procedimientos principales:

1. Un diseño adecuado de la composición química para incluir los microaleantes como el niobio, vanadio, titanio, etc., con lo cual se llega al concepto de aceros microaleados.

2. Una laminación controlada que ayude a la refinación de grano así como a la precipitación, lo más fina posible, de carburos y nitruros de niobio, vanadio, etc. La presencia de estas partículas no sólo ayuda a producir un grano fino sino que a la vez también produce subestructuras las cuales también ayudan a aumentar las propiedades mecánicas de los aceros.

Hasta alrededor de los años de 1940 a 1950 se entendía por propiedades mecánicas a las propiedades a tensión, es decir la resistencia a la cedencia, resistencia última y resistencia a la fractura. Estos conceptos eran incluidos en la materia de Resistencia de Materiales. Sin embargo de los años de 1940 en adelante se comenzó a investigar las fracturas repentinas que sucedían sobre todo en barcos petroleros, bajo condiciones de mar en calma pero a bajas temperaturas. Estas investigaciones llevaron a la conclusión de que materiales normalmente dúctiles se fragilizaban al descender las temperaturas, pero también se encontró que otros factores fragilizantes eran la presencia de concentradores de esfuerzos tales como defectos internos y superficiales, y la aplicación de cargas súbitas.

Como resultado final se diseñó la prueba de impacto en donde se pretendía simular condiciones de servicio tales como golpes, descensos de temperaturas como las que experimentaban los gasoductos en Alaska, Siberia, etc., y defectos superficiales como arañazos, cambios de sección, etc., o bien defectos internos como porosidades, inclusiones no-metálicas, etc.

Actualmente se han diseñado diferentes pruebas de impacto pero las más usadas son las de péndulo CVN y la de caída libre. sin embargo existen gran variedad de otras pruebas de impacto, inclusive la de caída libre (DWIT), tiene variedad en cuanto al peso del cabezal que cae, la altura de caída, etc. En Monclova, Coah. se cuenta con una máquina de impacto de caída libre de 5 metros de altura para probar placas de aceros, microaleados o no, en donde se quiebran probetas de material con todo el espesor real.

Se ha avanzado mucho en el campo de las propiedades mecánicas y actualmente se cuentan con pruebas como la de torsión para simular las condiciones de laminación en caliente o en frío, por ejemplo para simular las condiciones de laminación controlada; la prueba de termofluencia, la de fatiga, etc. Las pruebas para soldaduras tienen en sí mismas mucha variedad.

Sin embargo para aceros microaleados las que se emplean son la de tensión para determinar el límite elástico y la de impacto para determinar la tenacidad a impacto y la temperatura de transición.

La metalurgia mecánica es el estudio de las propiedades mecánicas de los metales y su relación con la microestructura de ellos. Por lo tanto esta investigación concierne más que nada al área de la metalurgia mecánica y es la primera que se realiza en aceros microaleados fabricados en AHMSA, S. A. de C. V. para conocer mejor las propiedades y microestructuras de dichos aceros. AHMSA comenzó a fabricar aceros microaleados desde alrededor de 1960 y actualmente fabrica más de 30 grados de dichos aceros tales como los X52, X55, X60, X65, X70, (para gasoductos).