

**EFFECTO DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA SOBRE LA FRAGILIZACIÓN POR
GALVANIZADO EN UN ACERO SAE 1020**

CAMILA ANDREA RUEDA ROMERO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2014

**EFFECTO DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA SOBRE LA FRAGILIZACIÓN POR
GALVANIZADO EN UN ACERO SAE 1020**

CAMILA ANDREA RUEDA ROMERO

**Trabajo de Grado, presentado como requisito parcial para optar el título de
Ingeniero Metalúrgico**

Director

Profesor IVÁN URIBE PÉREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES

BUCARAMANGA

2014

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS.....	15
OBJETIVO GENERAL	15
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	15
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	16
1.1 PROCESO DE GALVANIZACIÓN EN CALIENTE.....	16
1.2 DIAGRAMA Fe-Zn	17
1.3 MECANISMOS DE DAÑO DURANTE LA GALVANIZACIÓN EN CALIENTE	19
1.4 FRAGILIZACIÓN POR GALVANIZADO	20
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	24
2.1 OBTECCIÓN DEL MATERIAL.....	25
2.1.1 PROBETAS EXPERIMENTALES	25
2.1.2 PROBETAS CASO PRÁCTICO	25
2.1.3 OTROS MATERIALES.....	27
2.2 PREPARACIÓN DE PROBETAS	27
2.3 ENSAYOS EXPERIMENTALES.....	28
2.3.1 RECOCIDO.....	28
2.3.2 ENSAYOS MECÁNICOS	29
2.3.2.1 ENSAYO TRACCIÓN.....	29
2.3.2.2 ENSAYO TORSIÓN	30

2.3.2.3	ENSAYO FLEXIÓN	32
2.3.3	SOLDADURA.....	33
2.3.4	GALVANIZADO EN CALIENTE	35
2.4	METALOGRAFÍA.....	36
2.4.1	REGISTRO FOTOGRÁFICO	37
2.5	ANÁLISIS DE MUESTRAS	37
3.	RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	38
3.1	ANALISIS METALOGRÁFICO DEL RECOCIDO.....	38
3.2	BAÑO DE ZINC	39
3.3	MUESTRA SIN DEFORMACIÓN PLASTICA	40
3.4	DEFORMACIÓN PLASTICA EN TRACCIÓN	41
3.5	DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN TORSIÓN.....	42
3.6	DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN FLEXIÓN.....	44
3.7	PLACAS SOLDADAS	47
3.8	MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	48
3.9	CASO PRÁCTICO	50
3.10	COMPARACIÓN DE MUESTRAS DEFORMADAS PLASTICAMENTE	55
4.	CONCLUSIONES	57
5.	RECOMENDACIONES	59
	BIBLIOGRAFÍA.....	60
	ANEXOS.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama típico del proceso de galvanizado	16
Figura 2. Diagrama de equilibrio Fe-Zn	17
Figura 3. Microestructura típica de acero galvanizado (Espesor nominal 100 μ m)	18
Figura 4. Pre-requisitos para generación LMAC	20
Figura 5. Esfuerzos residuales de un acero laminado y de una placa soldada	21
Figura 6. Morfología típica de las grietas que resultan de FML	23
Figura 7. Diagrama de actividades desarrollo experimental	24
Figura 8. Cuba con falla en servicio.....	26
Figura 9. Microestructura material de la cuba tomada a 100X.....	26
Figura 10. Especificación de dimensiones probetas	28
Figura 11. Etapas del recocido aplicado	29
Figura 12. Maquina universal de ensayos MTS	29
Figura 13. Equipo de torsión Time Group de 2000 Nw	31
Figura 14. Maquina universal de ensayos Time Group de 20 KN.....	32
Figura 15. Diseño de junta en bisel V	34
Figura 16. Especificaciones del galvanizado OISA S.A	35
Figura 17. Muestra de acero galvanizado en bakelita con protección de borde	36
Figura 18. Microestructura del acero SAE 1020 recocida 500x	38
Figura 19. Probetas galvanizadas.....	39
Figura 20. Análisis de espectroscopia de energía dispersa capa de Zinc de un acero SAE 1020.....	40

Figura 21. Micrográficas de un acero SAE 1020 sin deformación plástica galvanizadas: a) 200x y b) 1000x	41
Figura 22. Microestructura de un acero SAE 1020 galvanizado sometido a tracción. a) Muestra A ₂ Tomada a 200x. b) Muestra A ₂ Tomada a 1000x. c) Muestra B ₂ Tomada a 1000x. Atacadas con nital.	42
Figura 23. Micrografía de acero SAE 1020 probeta D3 tomada a 100X y 500X, sin ataque químico.	43
Figura 24. Microestructuras de un acero ASI SAE 1020 galvanizados sometidos a torsión. a). Probeta C2 tomada a 1000x. b). Probeta D3 tomada a 1000x y c). Probeta E2 tomada a 1500x. Atacadas con Picral.....	44
Figura 25. Probeta G ₃ tomada a 200x y 500x aumentos sin ataque químico	45
Figura 26. Probeta H ₃ tomada a 100x y 200x aumentos sin ataque químico	45
Figura 27. Microestructuras de acero ASI SAE 1020 galvanizados sometidos a flexión. a). Probeta F ₂ tomada a 1000x. b). Probeta G ₃ tomada a 1000x y c). Probeta H ₃ tomada a 1500x. Atacadas con Picral	46
Figura 28. Micrografía de un acero SAE 1020 sometida a un proceso de soldadura. a). Probeta M ₁ soldada con un electrodo E6013 y b) Probeta N ₂ soldada con un electrodo E7018	47
Figura 29. Tensión y compresión en probetas soldadas.....	48
Figura 30. Cuba GALVANIZADOS GARCIA S.A	51
Figura 31. Cambio microestructural del borde hacia el centro de la cuba a 50X, atacada con nital.....	52
Figura 32. Análisis de espectroscopia de energía dispersa zona de interés cuba.	53
Figura 33. Micrografía de la cuba a 50X, 100X y 200X. Atacada con Picral	54
Figura 34. Micrografía por microscopia electrónica de barrido SEM de la cuba ...	55

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química acero SAE 1020.....	25
Tabla 2. Condiciones del ensayo de tracción	30
Tabla 3. Condiciones del ensayo de torsión.	31
Tabla 4. Características del ensayo de flexión.....	33
Tabla 5. Condiciones del proceso de soldadura	34
Tabla 6. Análisis de microscopia electrónica de barrido acero SAE 1020 galvanizado.....	49
Tabla 7. Comparación del comportamiento del acero SAE 1020 en diferentes mecanismos de deformación plástica.....	56

INDICE DE ANEXOS

Anexo A. Resultados del ensayo de tracción.....	65
Anexo B. Resultados del ensayo de torsión.	66
Anexo C. Resultados del ensayo de flexión.....	66
Anexo D. Cálculos para porcentajes de deformación	67
Anexo E. Reactivos Químicos.....	68

RESUME

TÍTULO: EFECTO DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA SOBRE LA FRAGILIZACIÓN POR GALVANIZADO EN UN ACERO SAE 1020

AUTOR: RUEDA ROMERO Camila Andrea**.

PALABRAS CLAVES: Fragilización por Galvanizado, Deformación Plástica, Acero SAE 1020, Ensayo de Tracción, Ensayo de Flexión, Ensayo de Torsión.

En la industria Diversos sectores se encuentran sometidos a condiciones de trabajo severas en ambientes agresivos, siendo determinante en el inicio del fenómeno de la corrosión; Para prevenir esto grandes piezas de acero estructural son llevadas al baño de galvanizado donde en ocasiones se generan y crecen fisuras, las cuales quedan cubiertas por una capa metálica de Zn impidiendo que estas sean detectadas en la etapa de inspección, dándole una mayor probabilidad de falla a la pieza en servicio.

En este trabajo se buscó evaluar la influencia de la deformación plástica sobre la fragilización por galvanizado en un acero sometido al proceso de galvanizado, para esto se utilizó un acero SAE 1020 en forma de platinas y varillas las cuales se sometieron a los ensayos de tracción, torsión, flexión y finalmente a una soldadura, que tienen como finalidad la creación y generación de esfuerzos residuales de diferente tipo para medir la influencia de estos en el agrietamiento de acero galvanizados mas no evaluar el comportamiento mecánico del acero a emplear.

Mediante la realización del presente trabajo se han estudiado aspectos fundamentales en la fragilización del material y las grietas generadas por el galvanizado las cuales se identificaron por medio de metalografía y se encontró que al realizar el proceso de galvanizado, este no presentara las mejores condiciones de adherencia, debido a las deformaciones superficiales presentes en el material las cuales provocan en la mayoría de probetas una serie de grietas longitudinales a lo largo del recubrimiento.

*Proyecto de Pregrado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica

Ingeniería Metalúrgica. Director: Iván Uribe Pérez

ABSTRACT

**TITLE: EFFECT OF THE PLASTIC DEFORMATION ON
EMBRITTELEMENT BY GALVANIZED OF SAE 1020 STEEL**

AUTHOR: RUEDA ROMERO Camila Andrea**.

KEYWORDS: Embrittlement by galvanized, Plastic Deformation, SAE 1020 Steel, Tensile Test, Flexural Test, Torsion Test

In the industry, various sectors are subject to severe working conditions and harsh environments, such conditions are key during the first stages of corrosion. To prevent this phenomenon, large blocks of steel are galvanized, sometimes cracks develop and grow under galvanization, these cracks are covered by a Zn metallic layer, preventing their detection during the inspection stage, thus enhancing the probability of failure of the working piece.

This research aims to evaluate the influence of plastic deformation on the fragilization caused by galvanization on galvanized Steel. SAE 1020 steel sheets and rods were used and tensile, flexural, torsion and welding tests were carried upon them, in order to create and develop residual stress of different types, with the objective of assessing the influence of such on the cracking of galvanized Steel, rather than assessing the mechanical behavior of the Steel used in this study.

By conducting this research, fundamental aspects of material fragilization and the cracks generated by galvanization have been studied. Cracks were spotted by the use of metallography and it turned out that the adherence by galvanization is likely to fail because of the internal and superficial deformations present in the material, which causes intergranular cracks along the coating in most of the specimens.

*Undergraduate Project.

** Faculty of Engineering Physicochemical, School of Metallurgical Engineering.

Metallurgical Engineering. Director: Ivan Uribe Pérez.

INTRODUCCIÓN

Diversos sectores de la industria se encuentran sometidos a condiciones de trabajo severas en ambientes agresivos, lo cual es determinante en el inicio del fenómeno de la corrosión. Con el fin de contrarrestar este hecho que se convierte en un gran problema estructural, se han diseñado varios métodos de protección dependiendo del material, como lo es el uso de pinturas protectoras, recubrimientos metálicos y plásticos.

La galvanización en caliente es un proceso industrial usado hace más de 150 años, el cual consiste en sumergir piezas de acero estructural en un baño líquido de Zn durante 5 a 10 minutos a una temperatura de 450°C ^[32], aunque el Zinc funde a 419°C se utiliza para el baño 450°C pues es en ese instante que el acero y el zinc tiene mayor afinidad y por difusión forma Zn-Fe sobre la superficie de la pieza. Además de ser un excelente mecanismo de protección contra la corrosión de aceros estructurales la galvanización en caliente es uno de los métodos de protección más económicos (debido al bajo costo de energías y generación mínima de residuos).

En la industria, grandes piezas de acero estructural son llevadas al baño de galvanizado donde en ocasiones se generan y crecen fisuras, las cuales quedan cubiertas por la capa metálica de Zn impidiendo que estas sean detectadas en la etapa de inspección, dándole una mayor probabilidad de falla a la pieza en servicio. Estas fisuras dan inicio al fenómeno conocido como fragilización por metal líquido, que está relacionado con la pérdida de ductilidad del metal cuando es sometido a esfuerzos de tensión previos a la galvanización, generados ocasionalmente en el proceso de conformado o soldadura.

Mediante la investigación realizada para este trabajo, se buscó estudiar el efecto de las tensiones residuales producidas por deformación y/o soldadura sobre la

fragilización o agrietamiento posterior al proceso de galvanizado, variando la deformación plástica mediante ensayos mecánicos como tracción, torsión y flexión. Se obtuvo que a mayor deformación mayor será la presencia de microgrietas en el recubrimiento las cuales comprometer la estabilidad de la pieza.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la influencia de la deformación plástica sobre la fragilización por galvanizado en un acero SAE 1020 sometido al proceso de galvanizado a condiciones industriales.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Someter un acero SAE 1020 en condición de recocido a diferentes niveles de deformación simuladas por medio del ensayo de tracción, torsión, flexión y muestras soldadas.
- Evaluar por microscopía óptica la posible formación de grietas producidas durante el proceso de galvanizado en muestras previamente deformadas.
- Comparar los resultados obtenidos con una muestra sin ningún tipo de deformación.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 PROCESO DE GALVANIZACIÓN EN CALIENTE

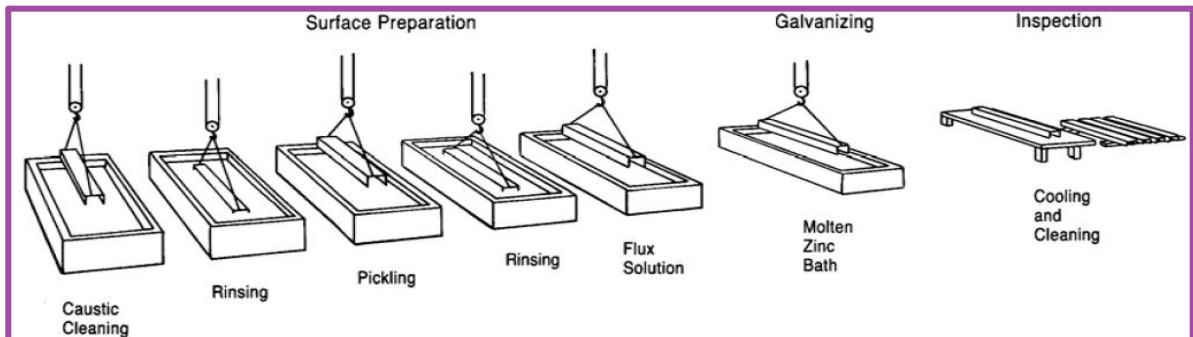
La galvanización por inmersión en caliente cuenta con 8 etapas, que deben cumplirse para el éxito del galvanizado. Las 5 primeras etapas están dedicadas a la limpieza de la superficie ya que es bien sabido que la eficiencia del proceso depende del estado previo de la superficie.^[20] Figura 1

Las ocho etapas del galvanizado son:

- Limpieza caustica
- Lavado
- Decapado
- Lavado
- Fluxado
- Galvanizado
- Enfriamiento
- Inspección

Las especificaciones sobre el proceso de galvanizado estan dadas por la norma ASTM A123.

Figura 1. Diagrama típico del proceso de galvanizado



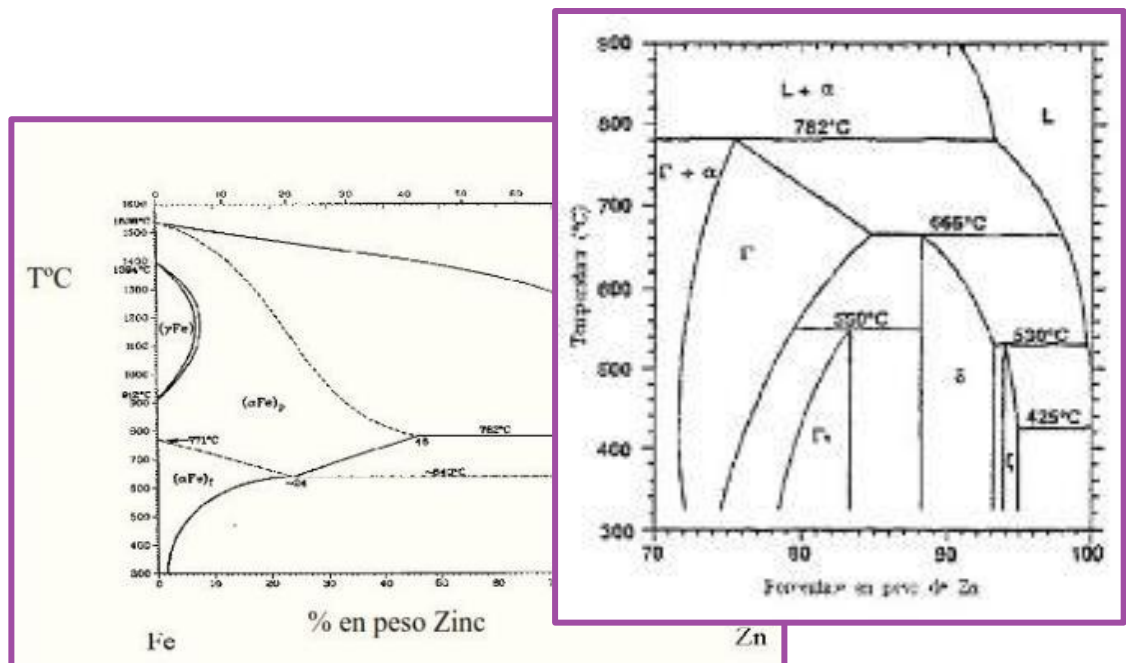
FUENTE: KINSTLER, Thomas. GalvaScience: Current Knowledge of the Cracking of Steels During Galvanizing. Springville: Synthesis of the Available Technical Literature and Collective Experience for the American Institute of Steel Construction. Pag.6. ^[24]

1.2 DIAGRAMA Fe-Zn

Bajo condiciones normales de galvanización el Fe se difunde en el Zn para formar una serie de capas constituidas por intermetálicos del sistema Zn-Fe, tal como se registra en la Figura 3.

Las fases que interactúan en el proceso de galvanización se puede observar en el diagrama de Fe-Zn en la Figura 2 mostrando las zona de interes de dicho diagrama en el recuadro resaltado .

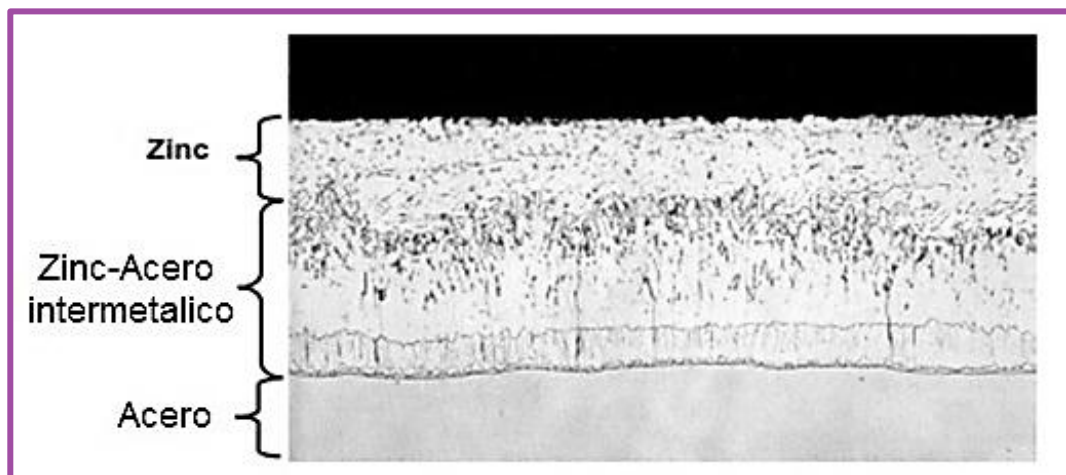
Figura 2. Diagrama de equilibrio Fe-Zn



FUENTE: MARDER, A.R. Progress in Materials Science: The metallurgy of zinc-coated steel. Bethlehem (USA): Department of Materials Science and Engineering, Lehigh University. 2000. Pág. 10-11. [27]

La fase α - Fe es una solución sólida de zinc en hierro, la cual existe en concentraciones bajas de zinc, la solubilidad del zinc a 250°C aproximadamente es del 4.5% al incrementar la temperatura a 623°C la solubilidad asciende a 20%. La fase Γ no es una fase terminal, por lo tanto es un compuesto intermetálico (no se ubica en los extremos del diagrama), y se reseña con la fórmula estequiométrica $FeZn_3$, mientras que la fase Γ_1 tiene una fórmula dada por Fe_3Zn_{10} siendo la más dura y frágil del sistema Fe-Zn. La fase δ aparece al incrementarse el contenido de Zinc y su fórmula estequiométrica es $FeZn_7$. La fase ξ existe en un rango de composiciones bastante estrecho, que esta entre 92-94% p/p de Zinc, se designan con la fórmula estequiométrica $FeZn_{13}$ y su estructura monoclinica le da una gran fragilidad^[3]. La Fase η - Zn se encuentra en solución sólida, siendo prácticamente Zinc puro con una pequeña cantidad de hierro (0.008% p/p máx.) y es una fase muy dúctil; Siendo en este estudio Γ_1 la fase de interés por su alta fragilidad. ^{[27] [31] [32]}

Figura 3. Microestructura típica de acero galvanizado (Espesor nominal 100 μ m)



FUENTE: KINSTLER, Thomas. GalvaScience: Current Knowledge of the Cracking of Steels During Galvanizing. Springville: Synthesis of the Available Technical Literature and Collective Experience for the American Institute of Steel Construction. Pag.7. ^[24]

1.3 MECANISMOS DE DAÑO DURANTE LA GALVANIZACIÓN EN CALIENTE

La galvanización en caliente como medio de protección del acero en contra de la corrosión es utilizada desde el siglo XIX. La ocurrencia de Fragilización por Metal Líquido (FML) como consecuencia del proceso de galvanización en caliente es reconocida desde la década de 1930 y la influencia de cargas externas sobre este tipo de daño se encuentra documentada a partir de la de década de 1980. A pesar de los esfuerzos aplicados en la investigación en los últimos 30 años, todavía no existe un entendimiento definitivo y claro sobre la naturaleza de la nucleación y propagación de las grietas que eventualmente ocurren, sea por efecto de FML o por otros mecanismos concurrentes. ^{[19] [14] [29]}

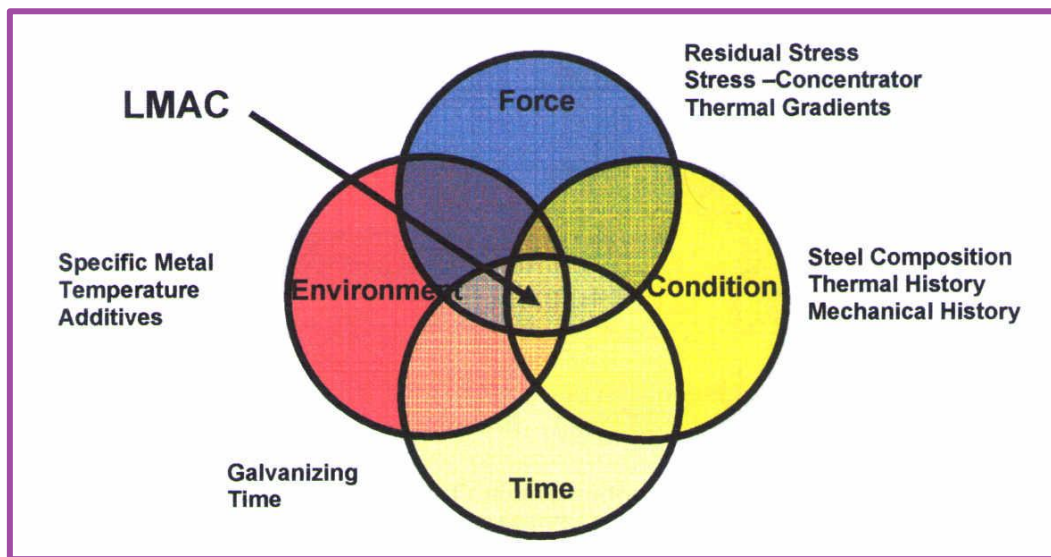
El proceso de galvanizado en caliente atribuye al acero cuatro posibles mecanismos de daño. ^{[21] [22] [28]}

- I. Fragilización por metal líquido
- II. Relajación de tensiones residuales elevadas bajo forma de grietas de distorsión
- III. Fragilización por hidrogeno: Los galvanizadores utilizan normalmente inhibidores durante el decapado como forma de prevenir la absorción del hidrogeno por el acero. Aceros de alta resistencia pueden ser susceptibles a fallas por ese mecanismo.
- IV. Fragilización por endurecimiento: Este mecanismo no es considerado relevante por las fuentes que lo referencian en el caso de la galvanización de estructuras metálicas, teniendo en cuenta que este se vuelve activo en aceros raramente destinados a esa aplicación.

1.4 FRAGILIZACIÓN POR GALVANIZADO

La fragilización por metal líquido o por galvanizado, también conocida como LMAC por sus siglas en inglés (Liquid Metal Assisted Cracking) es un fenómeno que se puede presentar en aceros susceptibles al proceso de galvanizado en caliente, en el cual se reduce la ductibilidad del metal sólido (Acero) mediante el contacto de la superficie con un metal líquido (Zinc); existe consenso en la literatura de que las grietas ocurren cuando el acero mantiene contacto con el baño de galvanización y de la actuación del mecanismo se da por la conjugación de los siguientes factores: (i) esfuerzos residuales, (ii) susceptibilidad de acero, (iii) composición del baño y (iv) tiempo de inmersión en el baño.

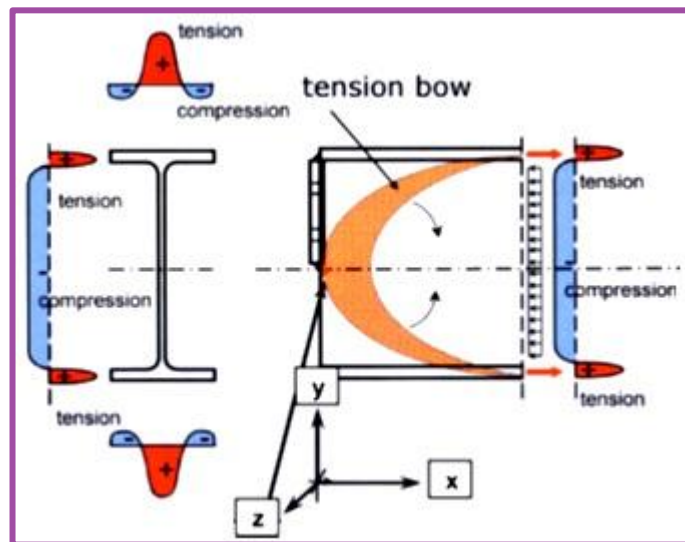
Figura 4. Pre-requisitos para generación LMAC



FUENTE: KINSTLER, Thomas. GalvaScience: Current Knowledge of the Cracking of Steels During Galvanizing. Springville: Synthesis of the Available Technical Literature and Collective Experience for the American Institute of Steel Construction. Pag. 24 ^[24]

Las tensiones que se manifiestan se consideran tensiones residuales que puede presentar el material debido a procesos de manufactura, fabricación y al proceso de galvanizado. En los procesos de fabricación el material puede estar sometido a diferentes cargas y a diversas deformaciones, generando así cargas residuales dentro del material. (Figura 5). Además en los procesos de fabricación se puede generar tensiones debido a que el material se somete a cambios bruscos de temperaturas, como en el proceso de soldadura, generando así esfuerzos residuales debido a los gradientes térmicos generados en el proceso.

Figura 5. Esfuerzos residuales de un acero laminado y de una placa soldada



FUENTE: JAMES, Neil. Engineering Failure Analysis: Residual stress influences on structural reliability. Plymouth: School of Engineering, University of Plymouth. 2011. Pag.6 ^[22]

La susceptibilidad del material depende de su composición química y sus propiedades mecánicas; por otro lado, el metal líquido puede afectar al material

dependiendo de las impurezas o constituyentes aleantes que este tenga o incluso la temperatura a la que se encuentra.

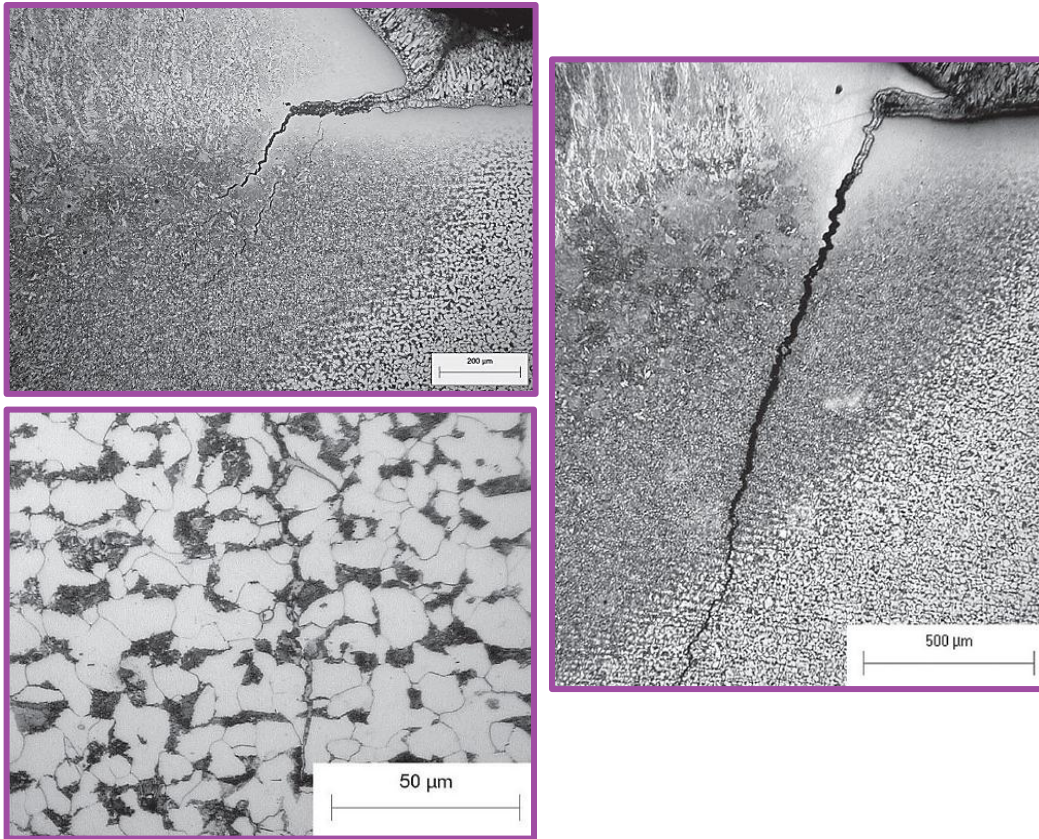
Los elementos que se agregan al baño tienen gran influencia en el recubrimiento, estos pueden determinar las propiedades del mismo. Algunos de estos elementos son el aluminio, el níquel y el titanio. El aluminio disminuye el tiempo de interacción entre Fe/Zn retrasando las reacciones que ocurren cuando estos se encuentran en contacto. Aunque ayudan al recubrimiento proporcionándole brillo y mejorando la ductilidad; por otro lado, evita que el zinc reaccione con el oxígeno. [32]

La adición de níquel reduce el efecto que le provoca el silicio al acero en cuanto a fragilidad y resistencia se refiere. Por otro lado, mejora la resistencia a la corrosión, la formabilidad y la resistencia al daño mecánico. Aunque si se usa en exceso puede provocar rugosidad en el recubrimiento y un menor espesor. La adición de titanio provoca que el recubrimiento tenga capas uniformes. [32]

Otros elementos que se influyen en este tipo de recubrimientos son: estaño, plomo y bismuto. Estos últimos en altas cantidades influyen en gran medida en la fragilidad del acero, provocando la generación y propagación acelerada de fisuras, generando altos riesgos en la estructura. [11][12][13][14][15]

El aspecto de las grietas resultantes del FML durante la galvanización es característico y permite identificar su origen. La propagación es principalmente intergranular, la fractura resultante es de naturaleza frágil, en la ausencia de la deformación plástica significativa en escala macroscópica y el espacio entre las caras de las grietas se encuentra relleno hasta las proximidades de la raíz por elementos contenidos en el baño de galvanización. En la Figura 6 se puede observar el comportamiento tipo de dichas grietas intergranulares.

Figura 6. Morfología típica de las grietas que resultan de FML

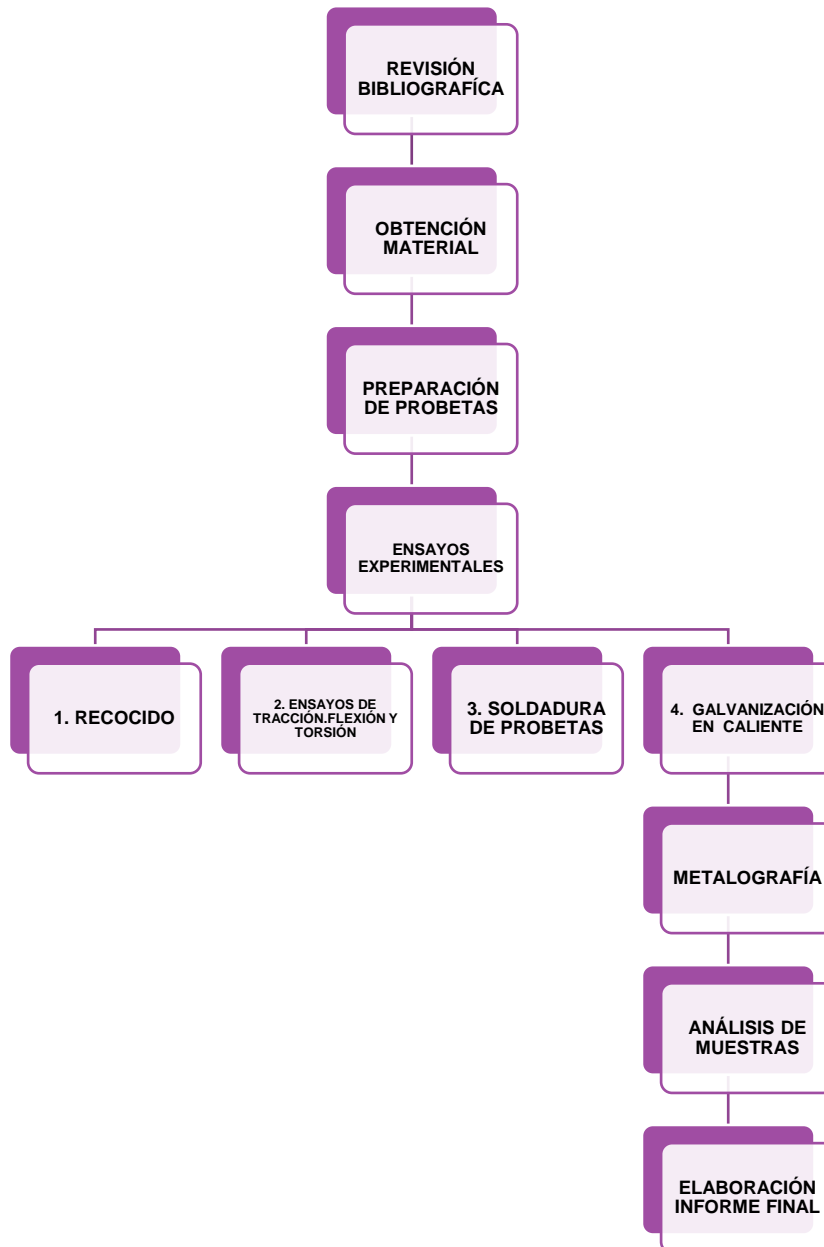


FUENTE: MRAZ, L., LESAY J. Problems with reliability and safety of hot dip galvanized steel structures. Bratislava (Slovakia): Welding Research Institute, Industrial Institute SR. 2009. Pag. 5 ^[28]

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la Figura 7 se muestra la metodología seguida para el desarrollo experimental del presente estudio la cual se describe a continuación:

Figura 7. Diagrama de actividades desarrollo experimental



FUENTE: Autora

2.1 OBTECCIÓN DEL MATERIAL

2.1.1 PROBETAS EXPERIMENTALES

Se utilizó un acero SAE 1020 en forma de platinas y varillas adquiridas en la ferretería ALCA SUMINISTROS INDUSTRIALES de Bucaramanga; en calidad de nuevas. A continuación se muestra la composición química de este acero:

Tabla 1. Composición química acero SAE 1020

COMPOSICIÓN QUIMICA DEL ACERO SAE 1020									
% C	%Mn	% P	% S	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% Al	% Cu
0,180	0,765	0,009	0,005	0,158	0,053	0,04	0,009	0,04	0,057

FUENTE: Certificado de calidad del acero SAE 1020, ALCA SUMINISTROS INDUSTRIALES

2.1.2 PROBETAS CASO PRÁCTICO

Una cuba de galvanización perteneciente a la empresa Galvanizados García Vega S.A presentó una falla en servicio de la cual se tomaron dos muestra, esta se extrajo de un área muy cercana a la falla, la cual se había sido sometida a un proceso de conformado de dobléz en frío y soldadura durante su proceso de fabricación. Para tener una idea más clara de la cuba ver Figura 8.

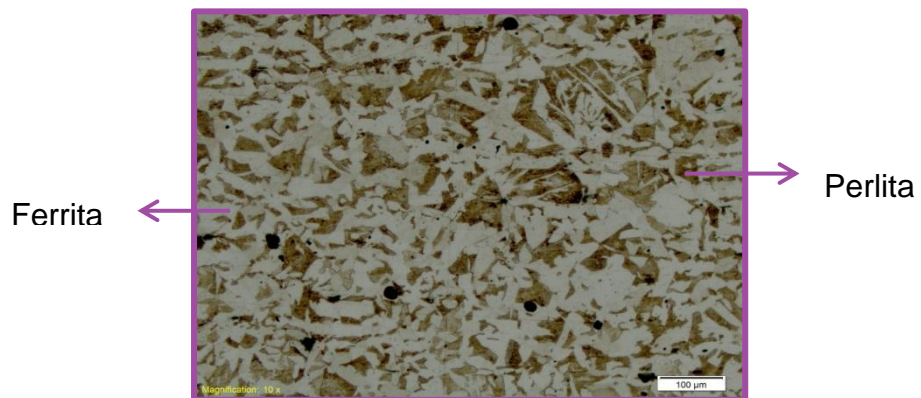
Figura 8. Cuba con falla en servicio



FUENTE: Autora

La Figura 9 muestra la micrografía bifásica de la cuba, en esta se puede observar la matriz ferrítica (zona blanca) con colonias de perlita (zona marrón), clasificando el material de la cuba como un acero SAE 1040, verificando la información suministrada por la empresa Galvanizados García Vega SAS.

Figura 9. Microestructura material de la cuba tomada a 100X



FUENTE: Autora.

2.1.3 OTROS MATERIALES

Los materiales como lijas, paños, alúmina, pasta de diamante y reactivos usados en el desarrollo de este proyecto fueron donados por la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la Universidad Industrial de Santander, mientras que en el material de aporte (E7018, E6013) usado para la soldadura fue donado por la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

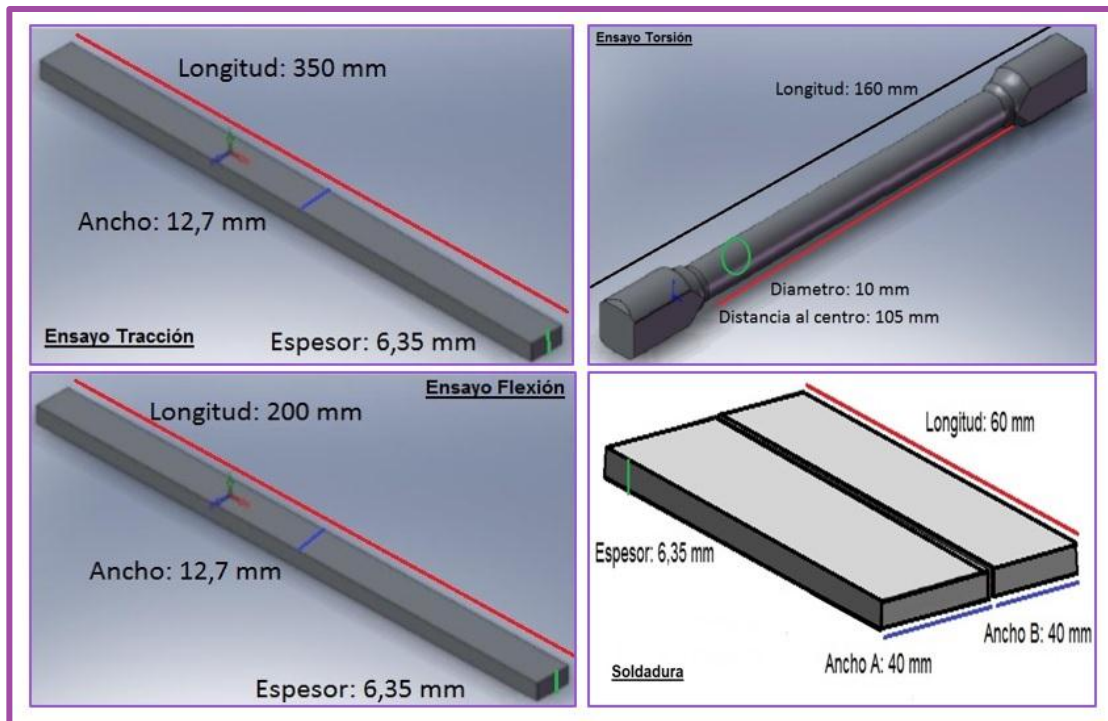
2.2 PREPARACIÓN DE PROBETAS

Dentro de la revisión bibliográfica se estudiaron las normas ASTM A370^[3], ASTM A938^[5], ASTM E290^[2], AWS D1.1^[10] sobre la preparación de probetas de ensayos de tracción, torsión, flexión y soldadura de aceros estructurales.^[18]

Se utilizaron 29 probetas las cuales se distribuyeron por ensayos de la siguiente manera: 6 en tracción, 9 en torsión, 9 en flexión, 2 soldadas con electrodo E7018 y 2 soldadas con electrodo E6013, dejando una probeta como referencia; estas fueron mecanizadas en la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander con el equipo TORNOCNC/ LEADWELL/ T6/ T6ENSAMBLE/ KE. Las dimensiones utilizadas en las probetas se pueden observar en la Figura 10.

Los ensayos tracción, torsión, flexión y soldadura tienen como finalidad la creación y generación de esfuerzos residuales de diferente tipo para medir la influencia de estos en el agrietamiento de acero galvanizados mas no evaluar el comportamiento mecánico del acero a emplear (SAE 1020)

Figura 10. Especificación de dimensiones probetas



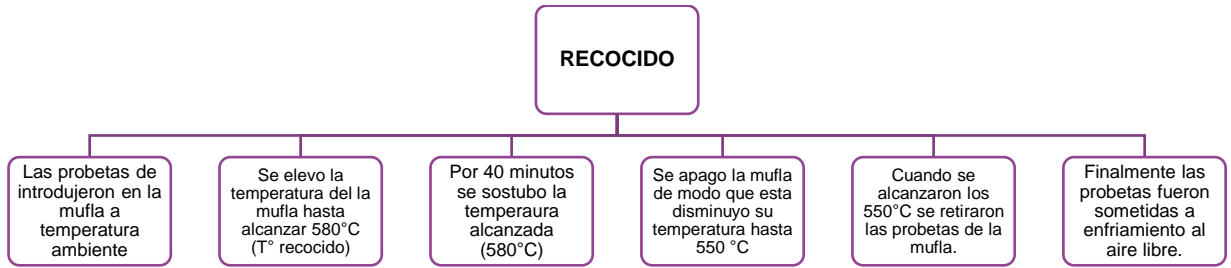
FUENTE: Autora

2.3 ENSAYOS EXPERIMENTALES

2.3.1 RECOCIDO

Se sometieron a recocido 29 probetas con el fin de aliviar las tensiones que posiblemente se produjeron durante su mecanizado, este tratamiento térmico se realizó en la mufla del laboratorio de pirometalurgia ubicado en escuela de Ingeniería Metalúrgica y ciencia de materiales de la Universidad Industrial de Santander. Teniendo en cuenta las dimensiones de las probetas y su material se determinaron las condiciones del tratamiento térmico que se puede ver en la Figura 11.

Figura 11. Etapas del recocido aplicado



FUENTE: VALENCIA, G. Asdrúbal. Tecnología del tratamiento térmico de los metales. [35]

2.3.2 ENSAYOS MECÁNICOS

2.3.2.1 ENSAYO TRACCIÓN

Seis probetas fueron sometidas al ensayo de tracción según la norma ASTM A370 [3], con un diferente porcentaje de deformación. Este ensayo se llevó acabo en la maquina universal de ensayos MTS ubicada en el laboratorio de Resistencia de Materiales de la Escuela Ingeniería Civil en la Universidad Industrial de Santander.

Figura 12. Maquina universal de ensayos MTS



FUENTE: Autora

Las probetas de tracción cuentan inicialmente con una longitud de 350mm de la cual solo 160mm van a ser tenidos en cuenta en el desarrollo del ensayo, esto se debe al espacio que necesitan las mordazas de la máquina para sostener la probeta pues cada una tiene una longitud de 95mm. En la Tabla 2 se pueden observar las condiciones del ensayo para las probetas a analizar en esta investigación.

Tabla 2. Condiciones del ensayo de tracción

MUESTRA	CARGA INICIAL [kN]	CARGA FINAL [kN]	LONGITUD INICIAL [mm]	LONGITUD FINAL [mm]	% DEFORMACIÓN
A ₂	2,5	33,1	160	168,5	5,17
B ₂	25,1	36,34	160	174	8,38

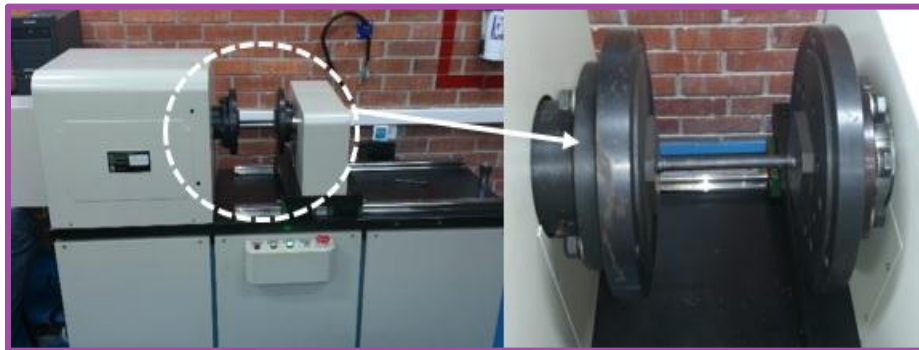
FUENTE: Autora

En el Anexo A se puede observar el comportamiento de las probetas frente al ensayo de tracción, allí se ve la elongación que presenta cada una de estas a medida que aumenta la carga.

2.3.2.2 ENSAYO TORSIÓN

Nueve probetas fueron sometidas al ensayo de torsión según la norma ASTM A938 ^[5] estas probetas presentan diferentes porcentajes de deformación angular. Este ensayo se llevó a cabo en el equipo de torsión Time Group de 2000 Nw de torque que se encuentra en el laboratorio de Resistencia de Materiales de las Unidades Tecnológicas de Santander.

Figura 13. Equipo de torsión Time Group de 2000 Nw



FUENTE: Autora

Las probetas de torsión contaban inicialmente con una longitud de 160mm en total, de los cuales solo se tendrá en cuenta 105 mm debido a que el resto corresponde a la sección necesaria para que las mordazas alineen las probetas en el equipo. En la tabla 3 se pueden observar las características principales del ensayo para las probeta a analizar.

En el anexo B se encuentra el comportamiento de las probetas ante este ensayo. Para cada probeta se utilizó un ángulo de torsión diferente con el fin de observar el comportamiento de las mismas a diferentes deformaciones. En donde la probeta que muestra mayor deformación es la probeta D₃, a la cual se le aplico un mayor ángulo de torsión y presento un momento torsor mayor.

Tabla 3. Condiciones del ensayo de torsión.

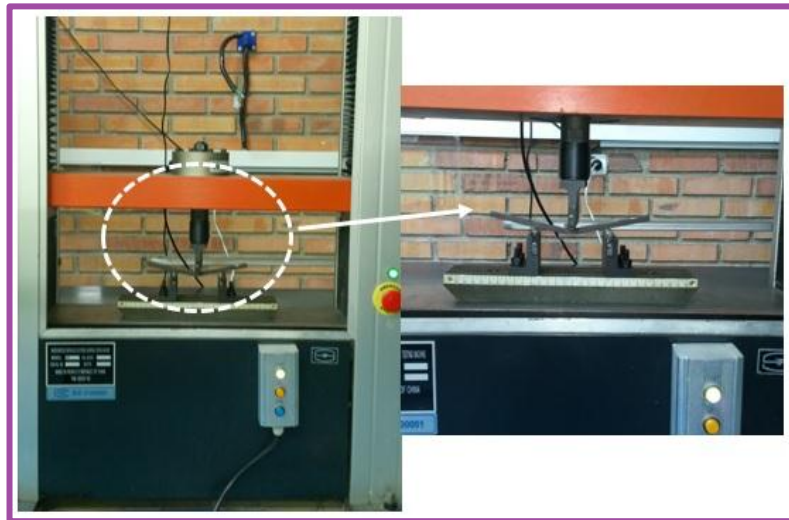
MUESTRA	MOMENTO TORSOR [Nm]	ANGULO DE TORSIÓN [°]	DEFORMACIÓN ANGULAR [°]
C ₂	102,2	44,5	2,11
D ₃	105	53,4	2,54
E ₂	99,5	32	1,52

FUENTE: Autora

2.3.2.3 ENSAYO FLEXIÓN

Nueve probetas fueron sometidas al ensayo de flexión según la norma ASTM E290 [2]; los porcentajes de deformación plástica de las probetas es diferente. Este ensayo se llevó acabo en la maquina universal de ensayos Time Group de 20 KN de carga que se encuentra en el laboratorio de Resistencia de Materiales de las Unidades Tecnológicas de Santander.

Figura 14. Maquina universal de ensayos Time Group de 20 KN



FUENTE: Autora

Las probetas a las cuales se les aplico el ensayo de flexión, contaban con una longitud total de 200 mm siendo su longitud efectiva 160mm, según la norma ASTM E290 las probetas debe estar soportadas a cada extremo a una distancia de 80 mm del centro. Para este ensayo se obtuvieron diferentes deformaciones en cada probeta. En la Tabla 4 se muestran las características principales del ensayo; cada probeta a analizar tuvo una carga máxima diferente, para evaluar el comportamiento de estas frente al galvanizado. [2]

Tabla 4. Características del ensayo de flexión

MUESTRA	LONGITUD INICIA [mm]	LONGITUD FINAL [mm]	% DEFORMACIÓN
F ₂	200	203,402	3
G ₃	200	205	4,4
H ₃	200	208,011	7,1

FUENTE: Autora

En el Anexo C se puede observar el comportamiento de las probetas frente al ensayo aplicado, estas probetas presentan el mismo comportamiento, diferenciándose principalmente en la deformación final obtenida debida a la carga aplicada.

2.3.3 SOLDADURA

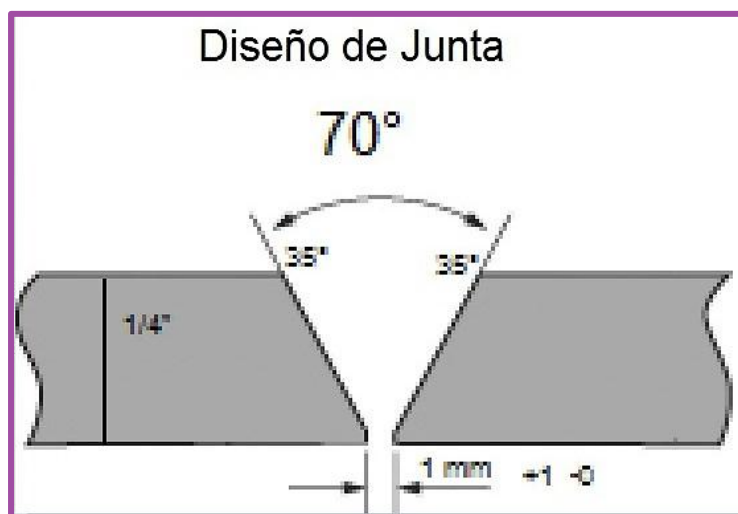
Cuatro probetas se sometieron a un proceso de soldadura por arco con electrodo revestido SMAW las juntas que se elaboraron para este proceso fueron juntas a tope con bisel en V especificadas según la norma AWS D1.1.^[10] Dos de estas probetas fueron soldadas con el electrodo de referencia E6013 y las otras dos con E7018 escogidos bajo las normas AWS A5.1^[9] y AWS A5.5^[8]. Las condiciones del proceso se especifican en la Tabla 5 y el diseño de la junta se puede apreciar en la Figura 15.

Tabla 5. Condiciones del proceso de soldadura

Electrodo	E6013	E7018
Características		
Proceso	SMAW	SMAW
Material Base	SAE 1020	SAE 1020
Diámetro Electrodo	2,4 mm	3,2 mm
Longitud Electrodo	350 mm	350 mm
Diseño de Junta	A tope con bisel V	A tope con bisel V
Amperaje	75A	120A

Fuente: Autora

Figura 15. Diseño de junta en bisel V

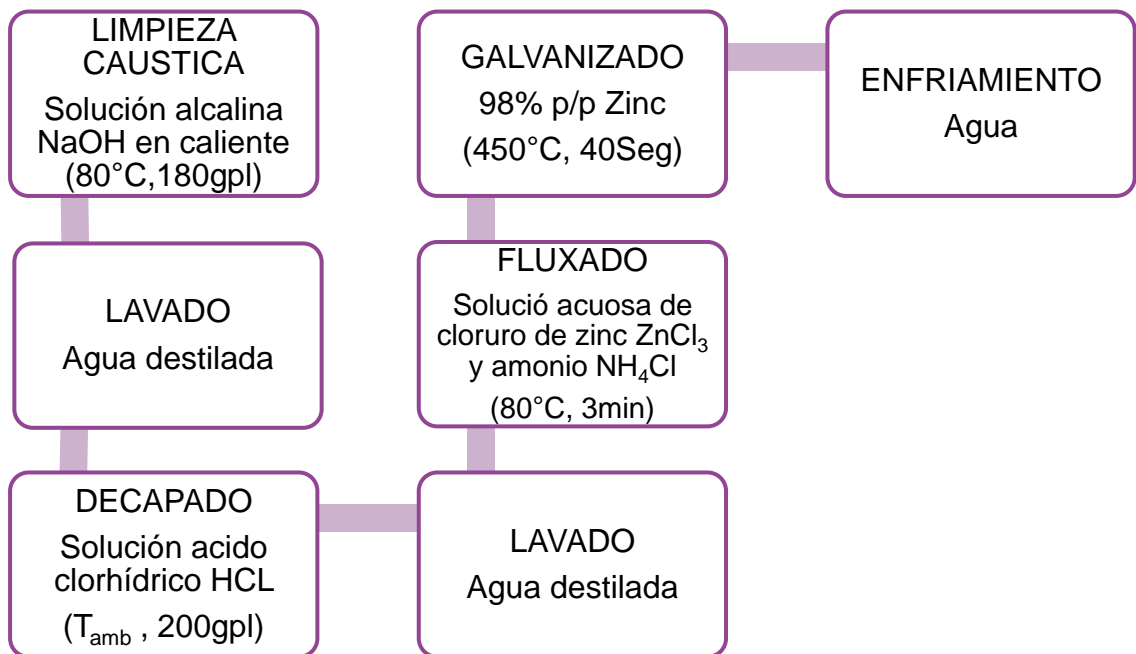


Fuente: Autora

2.3.4 GALVANIZADO EN CALIENTE

Se sometieron a galvanización en caliente veintinueve (29) probetas de las cuales se tomó una de referencia sin ser deformada previamente y veinticuatro deformadas plásticamente mediante los ensayos de tracción, torsión y flexión, siendo el resto sometidas a proceso de soldadura, este baño de zinc en caliente bajo condiciones industriales se llevó acabo en la empresa OISA S.A. de Bucaramanga donde este se realizó siguiendo la norma ASTM A123. En la Figura 16 se pueden ver las especificaciones y condiciones a las cuales se realizó en baño de zinc en caliente. [6]

Figura 16. Especificaciones del galvanizado OISA S.A

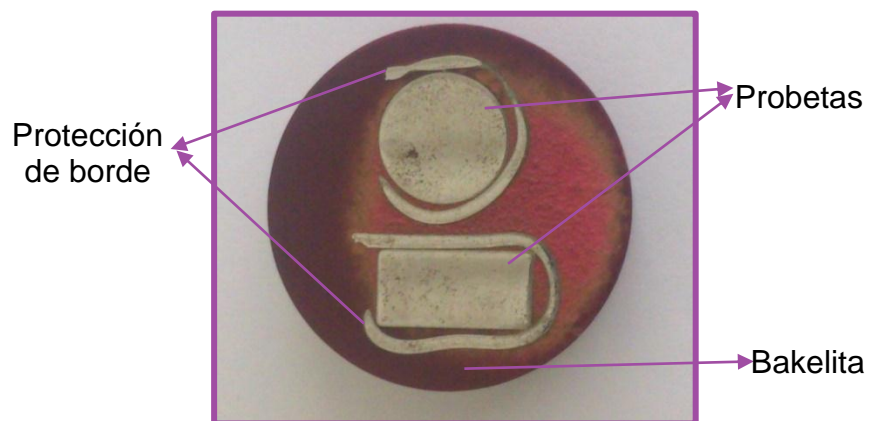


FUENTE: Galvanizados OISA S.A

2.4 METALOGRAFÍA

Las veintinueve probetas previamente galvanizadas fueron cortadas en el laboratorio de metalografía de la escuela Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la Universidad Industrial de Santander con los siguientes equipos: cortadora sinfín, cortadora de precisión Buehler IsoMet 1000 y cortadora de disco, las probetas fueron montadas en bakelita para una mejor manipulación al momento de realizar el desbaste y los ataques. En el momento del montaje, alrededor de las muestras se puso un protector de borde el cual, consiste en un pequeño alambre de dureza mayor al de las muestras, con el fin de evitar que los bordes se redondearán, limitando el posterior análisis de la capa de zinc y para evitar que al pulir la capa zinc llegue a ser retirada. Figura 17.

Figura 17. Muestra de acero galvanizado en bakelita con protección de borde



FUENTE: Autora

Se realizó la caracterización por microscopía óptica y microscopía de barrido electrónico. Las muestras de material base se prepararon superficialmente mediante desbaste con papel abrasivo de carburo de silicio, hasta una

granulometría de 600, seguido de un pulido con alúmina (0.3 y 0.05 μm) para obtener un acabado superficial tipo especular. ^[1]

Para revelar la microestructura del acero, la superficie pulida fue atacada con el reactivo nital y Picral (Anexo D.). ^[7]

2.4.1 REGISTRO FOTOGRÁFICO

El registro fotográfico se tomó con el microscopio óptico marca OLIMPUS GX 71 perteneciente al laboratorio de materiales I de la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la Universidad Industrial de Santander, a diferentes aumentos de 50X hasta 2000X, las muestras fueron tomadas empleando iluminación normal y filtros neutros para disminuir el brillo generado por el rayo de luz incidente.

Mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido SEM se analizaron 9 probetas, 1 de tracción, 1 de torsión, 1 de flexión, 4 soldadas y 2 del caso práctico de la cuba. Este análisis se llevó a cabo en el equipo Microscopio electrónico de barrido QUANTA FEG 650 del laboratorio de microscopía de la universidad Industrial de Santander en su sede de investigación Guatiguará, con el fin de mejorar la resolución de las micrografías y encontrar grietas más pronunciadas desde el material base.

2.5 ANÁLISIS DE MUESTRAS

Se realizó análisis metalográfico de probetas obtenidas previamente del proceso de galvanizado (24 deformadas, 4 soldadas, 1 sin deformación y 2 caso práctico) con el fin de encontrar formación de grietas sobre la interface acero-zinc y desde el recubrimiento hasta el acero; también se analizó la microestructura del acero antes y luego del recocido, con el fin de evaluar la efectividad del tratamiento térmico.

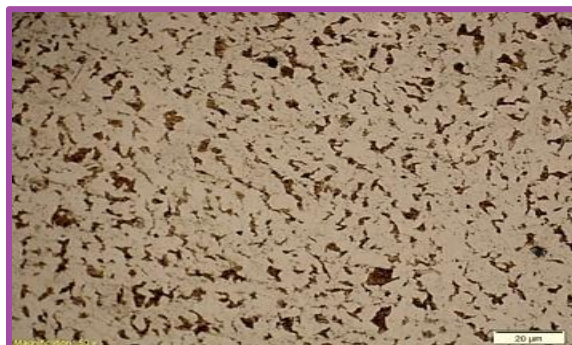
3. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Se realizó análisis metalográfico de las probetas obtenidas previamente del proceso de galvanizado (24 deformadas, 4 soldadas y 1 sin deformación) con el fin de encontrar formación de grietas sobre la interface acero-zinc que van desde la interfaz hasta el acero; adicionalmente, se estudió la microestructura del acero antes y después del recocido, con el fin de evaluar la efectividad de los ensayos mecánicos realizados buscando la generación de esfuerzos residuales.

3.1 ANALISIS METALOGRAFICO DEL RECOCIDO

Para evaluar efectividad de la deformación plástica sobre la fragilización por galvanizado de las probetas mecanizadas que se llevaron ha recocido. En la Figura 18 se encuentra la micrografía de este acero luego del tratamiento térmico aplicado, donde claramente se notan las colonias de perlita (oscuro) en una matriz ferrítica (claro).

Figura 18. Microestructura del acero SAE 1020 recocida 500x



FUENTE: autora

3.2 BAÑO DE ZINC

Las probetas previamente deformadas se llevaron a galvanización en caliente a una temperatura del baño de 450°C, tiempo de inmersión 40 s. y a un enfriamiento en agua. En la figura 19 se observan las probetas galvanizadas.

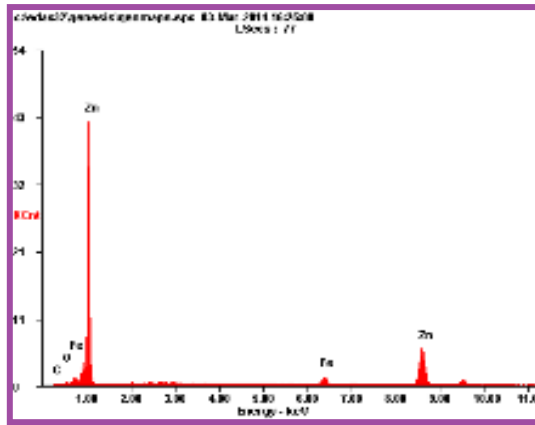
Figura 19. Probetas galvanizadas



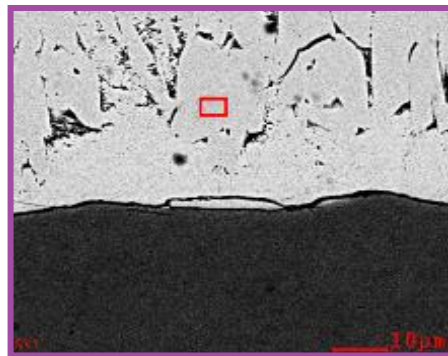
FUENTE: Autora

Adicionalmente se llevó a cabo un análisis de Espectroscopia de Energía Dispersa (EDS), para realizar un análisis químico elemental y así corroborar la efectividad del baño de zinc aplicado a las probetas de acero SAE 1020. Dicho análisis se realizó en la capa de zinc como se observa en la figura 20 el punto de muestreo se encuentra en la fase ξ donde el porcentaje de zinc esta entre 92-94% p/p. ^[27]

Figura 20. Análisis de espectroscopia de energía dispersa capa de Zinc de un acero SAE 1020.



Element	Wt%	At%
CK	00.66	03.36
OK	00.75	02.86
FeK	06.56	07.22
ZnK	92.03	86.55
Matrix	Correction	ZAF

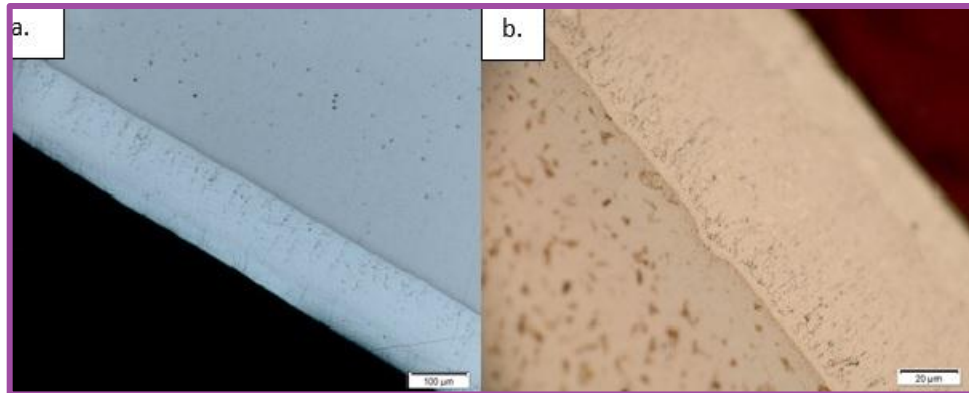


FUENTE: Autora

3.3 MUESTRA SIN DEFORMACIÓN PLÁSTICA

Se tomó una muestra de un acero SAE 1020 a la cual no se le realizó ningún tipo de deformación para analizar y comparar el efecto de las deformaciones en el recubrimiento aplicado. En la Figura 21 se observan las micrografías obtenidas de esta muestra en donde se observó la interfaz entre el recubrimiento y el metal base. Allí se puede ver que el recubrimiento no presenta ningún tipo de defecto y que tuvo una buena adhesión con el material (SAE 1020).

Figura 21. Micrográficas de un acero SAE 1020 sin deformación plástica galvanizadas: a) 200x y b) 1000x



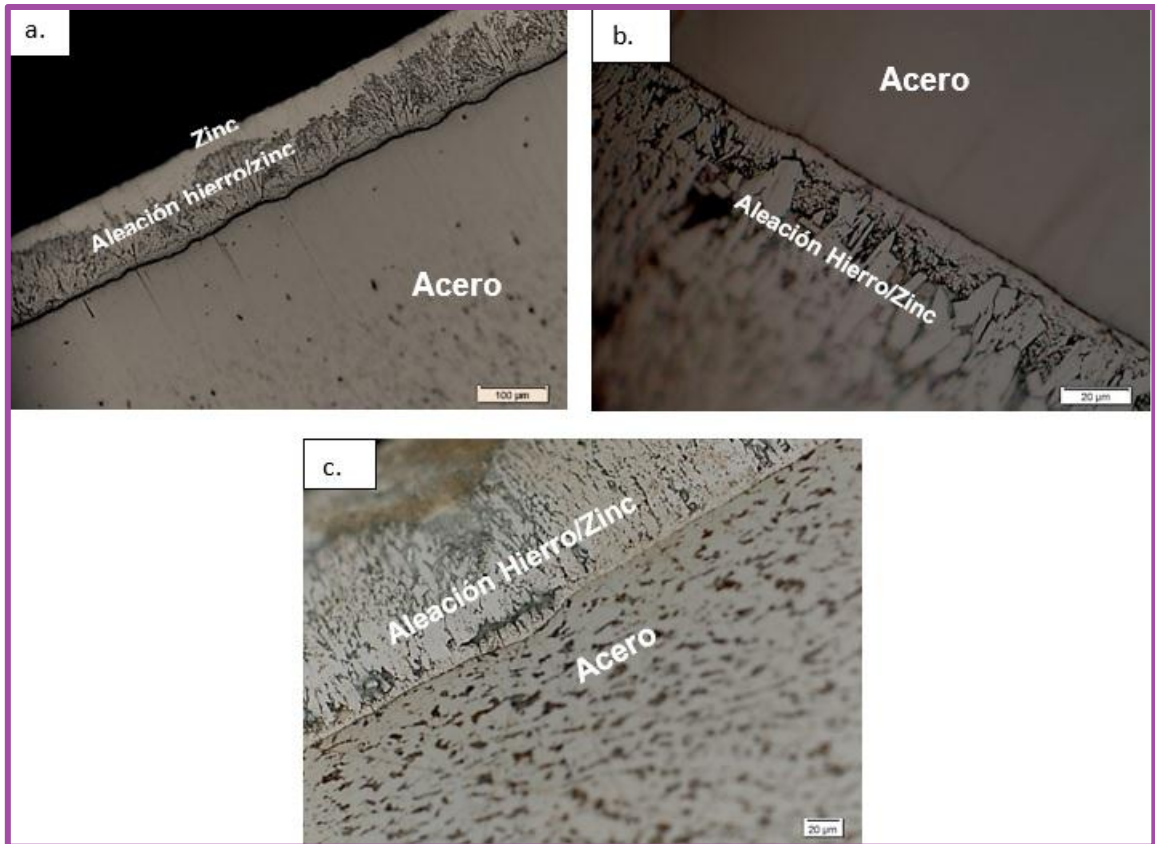
FUENTE: Autora.

3.4 DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN TRACCIÓN

Mediante el ensayo de tracción se buscó generar una concentración de esfuerzo en las probetas sometidas a este proceso, el estado de esfuerzo en tracción es de comportamiento axial lo que nos indica que las tensiones se están generando en esta dirección.

En la Figura 22 se encuentran las micrográficas obtenidas del acero SAE 1020 galvanizado, en donde se puede observar: la figura 22a) las capas intermetálicas que forma el zinc con el hierro (Zinc, aleación Fe-Zn, Acero), en las figuras 22b) y 22c) se observa un bajo comportamiento al agrietamiento, debido a la forma en que el ensayo distribuye los esfuerzos, pues estos afectan a la probeta en su totalidad y no se centra en un área específica, esto último debido a el diseño de probetas que se usaron para realizar el ensayo.

Figura 22. Microestructura de un acero SAE 1020 galvanizado sometido a tracción. a) Muestra A₂ Tomada a 200x. b) Muestra A₂ Tomada a 1000x. c) Muestra B₂ Tomada a 1000x. Atacadas con nital.



FUENTE: Autora.

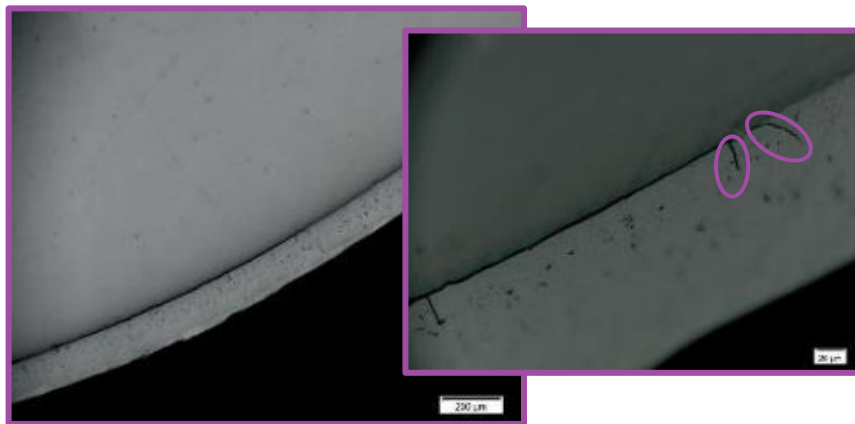
3.5 DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN TORSIÓN

El estado de esfuerzo en las probetas sometidas a torsión se encuentra distribuido en tres direcciones presentando una tensión cizallante, tensión de tracción y una de compresión.

En la Figuras 23 se observó la probeta D₃ sin ataque químico sometida a un porcentaje de deformación angular equivalente a 2,54°, allí se vio una micrografía

a 100X donde se ve levemente un posible despegue del recubrimiento sin embargo al aumentar a 500X se ve claramente dicha imperfección, observándose a su vez que al final del desprendimiento salen 2 pequeñas grietas hacia el recubrimiento.

Figura 23. Micrografía de acero SAE 1020 probeta D3 tomada a 100X y 500X, sin ataque químico.



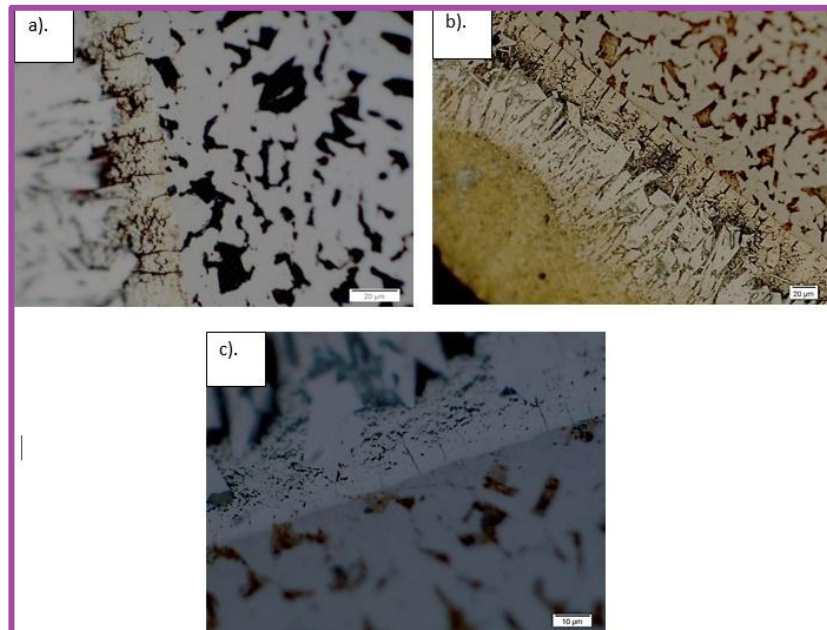
FUENTE: Autora

En la Figura 24 se pueden observar las micrografías de las probetas C_2 , D_3 y E_2 las cuales fueron sometidas al ensayo de torsión bajo porcentajes de deformación angular de $2,11^\circ$, $2,54^\circ$ y $1,52^\circ$, como se mencionó en el numeral 2.3.2.2. En estas micrografías se puede observar la interfaz entre el metal y el recubrimiento. En donde se observó una serie de grietas en cada una de estas, siendo más evidente en la Figura 23b) la cual presenta una mayor deformación en comparación con las otras dos probetas.

Estas grietas se manifiestan en mayor densidad en la zona del recubrimiento que presenta alta fragilidad (fase Γ_1) ^[27], debido a los compuestos intermetálicos

formados entre el zinc y acero, adicionalmente los esfuerzo residuales generados por el ensayo contribuyen en su formación.

Figura 24. Microestructuras de un acero ASI SAE 1020 galvanizados sometidos a torsión. a). Probeta C2 tomada a 1000x. b). Probeta D3 tomada a 1000x y c). Probeta E2 tomada a 1500x. Atacadas con Picral.



FUENTE: Autora.

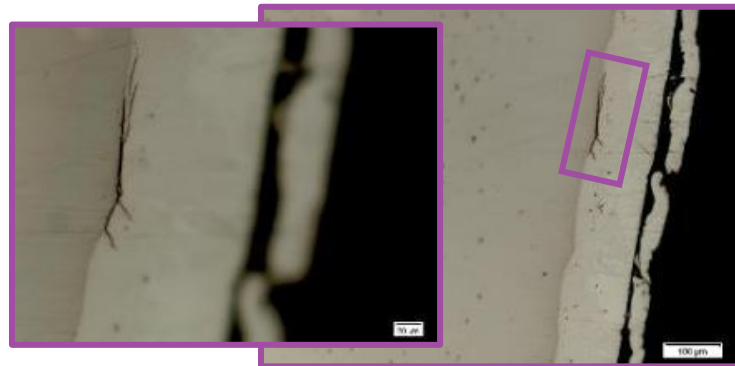
3.6 DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN FLEXIÓN

El esfuerzo que se produce para deformar el acero es de tensión en la parte baja de la barra, y a compresión en la de arriba, solo el punto neutro donde se aplica la carga no cambia, o no se deforma, la zona que se analizó para este caso es la que presento esfuerzo en tensión pues es la que me lleva a que el material

presente una deformación plástica y por lo tanto una concentración de esfuerzos en esta área.

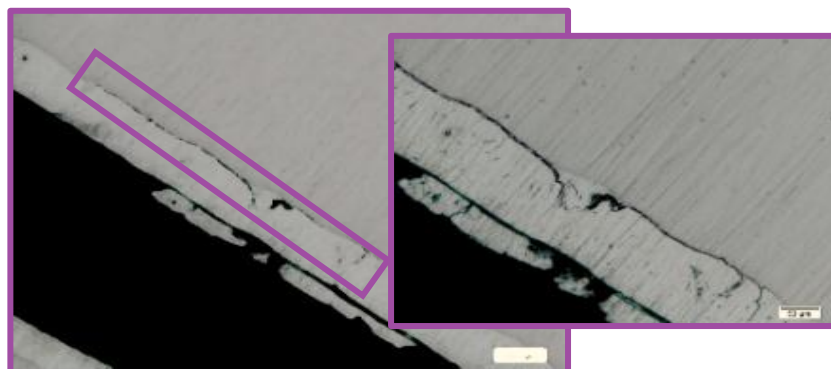
En la Figuras 25 y 26 se observan las probeta G_3 y H_3 sin ataque químico sometida a un porcentaje de deformación equivalente a 4,4% y 7,1%, en estas micrografías se observar el desprendimiento que presenta el material en toda la interfaz Fe-Zn y el comportamiento que este tiene así el recubrimiento.

Figura 25. Probeta G_3 tomada a 200x y 500x aumentos sin ataque químico



FUENTE: Autora

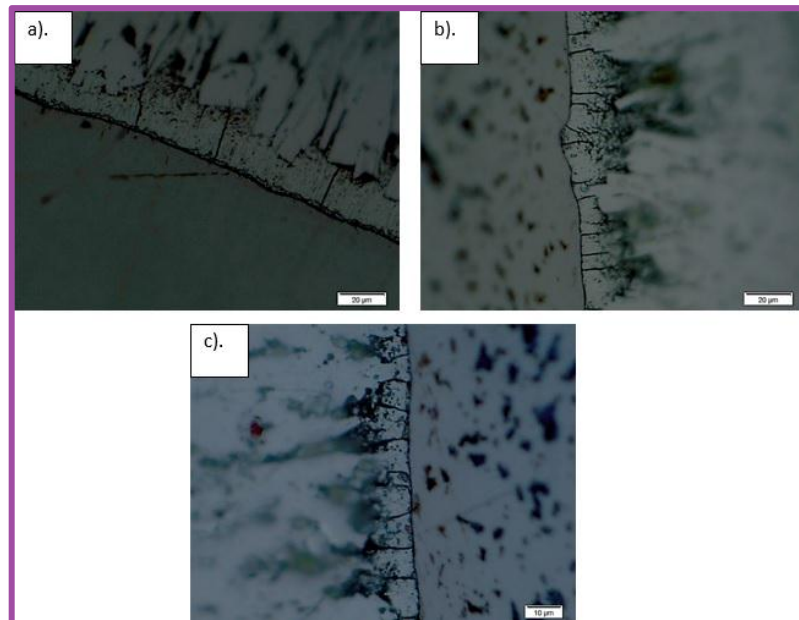
Figura 26. Probeta H_3 tomada a 100x y 200x aumentos sin ataque químico



FUENTE: Autora

En la Figura 27 se pueden apreciar las micrografías del acero SAE 1020 galvanizado sometido a un ensayo de flexión a diferentes deformaciones, en la Figura 27a) se observa la probeta F_2 la cual fue sometida a una deformación de 3% donde se evidencia la presencia de agrietamiento a lo largo de la interfaz Fe-Zinc esto debido a que allí se encuentra la fase más frágil del recubrimiento, seguidamente en la Figura 27b) se continua presentado dicho comportamiento de agrietamiento en la probeta G_3 siendo este más pronunciado e influenciado por la deformación aplicada siendo esta de 4,4%, finalmente en la Figura 27c) se encuentra la probeta H_3 la cual fue sometida a 7,1% de deformación, comparando esta figura con la Figura 27a) y 27b) se evidencia notoriamente la influencia de la deformación plástica sobre el agrietamiento que presenta el recubrimiento, pues a mayor deformación plástica mayor la posibilidad de agrietamiento.

Figura 27. Microestructuras de acero ASI SAE 1020 galvanizados sometidos a flexión. a). Probeta F_2 tomada a 1000x. b). Probeta G_3 tomada a 1000x y c). Probeta H_3 tomada a 1500x. Atacadas con Picral



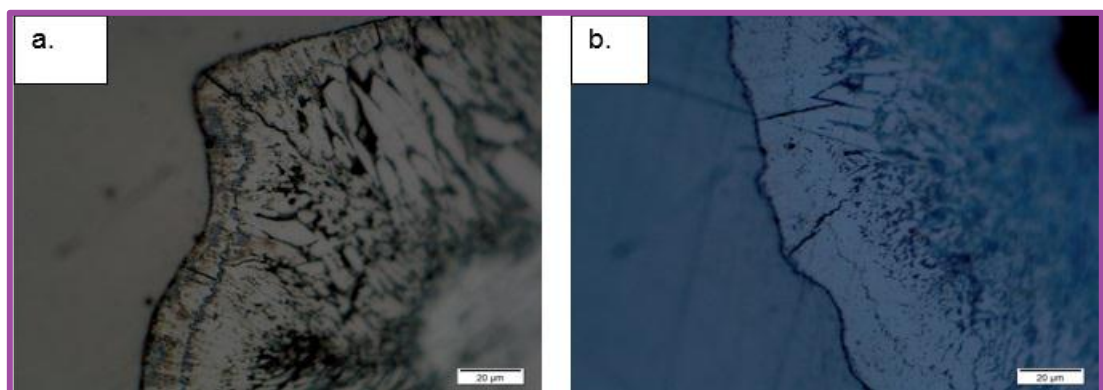
FUENTE: Autora.

3.7 PLACAS SOLDADAS

En la Figura 28 se puede apreciar las micrografías obtenidas para las probetas sometidas a un proceso de soldadura el cual se explicó en el numeral 2.3.3. Para este tipo de probetas se centró principalmente en la zona afectada térmicamente, esto debido a que esta presenta diferentes velocidades de enfriamiento, una en el metal de aporte y otra en el metal base. Esta diferencia en las velocidades de enfriamiento provoca en el material una serie de esfuerzos residuales.

También se observaron dos probetas de acero sometidas a un proceso de soldadura con electrodo revestido. En esta etapa se varió el electrodo usado en la soldadura para analizar la influencia de estos sobre la zona térmicamente afectada y su generación de esfuerzos residuales pues al variar el diámetro del electrodo y el amperaje cambian las condiciones del proceso y por ende la zona térmicamente afectada (ZAT). En la Figura 28 se observa la presencia de grietas a través del recubrimiento siendo estas más pronunciadas que las obtenidas en los ensayos mecánicos.

Figura 28. Micrografía de un acero SAE 1020 sometida a un proceso de soldadura. a). Probeta M_1 soldada con un electrodo E6013 y b) Probeta N_2 soldada con un electrodo E7018



FUENTE: Autora.

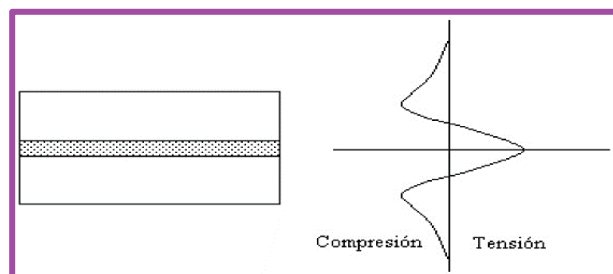
3.8 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Mediante la técnica de microscopia electrónica de barrido SEM se analizaron las probetas: 1 de tracción (B_2), 1 de torsión (E_3), 1 de flexión (H_3), 2 soldadas (M_2 , N_2), con el fin de analizar el zinc, la interfaz Fe-Zn y el acero buscando la presencia de posible microgrietas.

En la tabla 6 se muestran las micrografías obtenidas mediante microscopia electrónica de barrido SEM, de las probetas galvanizadas, obtenidas a 5.000X (C_3), 10.000X (A_2 , M_2 , N_2), 15.000X (H_3), dependiendo de la muestra analizada.

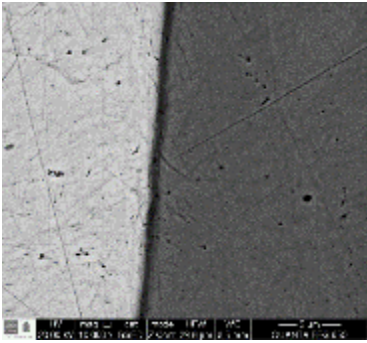
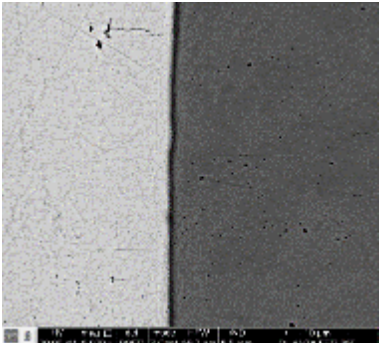
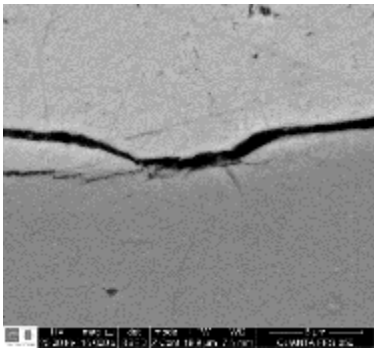
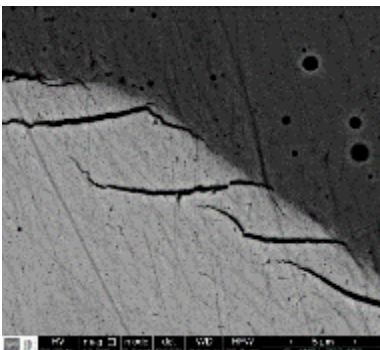
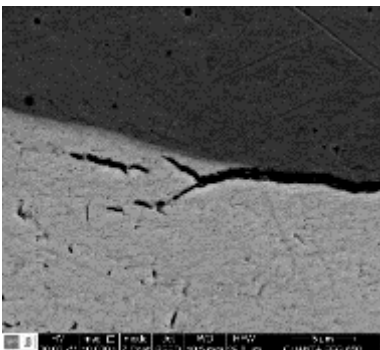
Al observar las micrografías sobre la interfaz Fe- Zinc, fue posible observar mayor presencia de agrietamiento en las muestras previamente sometidas a flexión y soldadura, siendo estas las que mejor se comportaron frente al ensayo de simulación de esfuerzos, ya que en flexión se distribuyen la acumulación de esfuerzos sobre la curvatura formada durante el ensayo mecánico y en las soldadas se manifiesta notablemente el posible efecto de la temperatura generando en el material una compresión (cordón) y tensión (metal base), pues el tamaño y espesor de la muestra provocan la aparición de esfuerzos residuales durante el momento del enfriamiento de pieza como se observa en la Figura 29. Sin embargo la probeta de tracción sigue mostrando un menor comportamiento al agrietamiento generado por la distribución de esfuerzos a la que fue sometida la probeta pues no se realizó una concentración de esfuerzos en una zona específica sino a través de toda la probeta.

Figura 29. Tensión y compresión en probetas soldadas



FUENTE: Autora

Tabla 6. Análisis de microscopía electrónica de barrido acero SAE 1020 galvanizado

Análisis de microscopía electrónica de barrido acero SAE 1020 galvanizado		
		
Probeta A ₂ ensayo de tracción	Probeta C ₃ ensayo de torsión	
		
Probeta H ₃ ensayo de flexión	Probeta M ₂ soldada con electrodo 6013	Probeta N ₂ soldada con electrodo 7018

FUENTE: Autora.

Todas las probetas galvanizadas de esta investigación presentaron algún proceso que generó deformaciones superficiales provocando así que en algunos casos su adherencia no fuera la más adecuada.

3.9 CASO PRÁCTICO

Para un análisis más concreto de la investigación realizada, se estudió un caso práctico sobre el efecto de la deformación plástica durante el proceso de galvanizado. Para esto se obtuvieron una serie de muestras de la cuba mencionada en el numeral 2.1.2.

Dicha cuba fue diseñada y fabricada por la empresa Galvanizados García S.A, para esto compraron láminas de acero SAE 1040, dos láminas de 6 metros de longitud por 70 cm de alto las cuales pasaron a ser los laterales de la cuba, dos láminas de 4 metros largo por 70 cm alto las cuales fueron sometidas a doblado en frío y se ubicaron en los extremos de la cuba, finalmente para el piso se utilizó una lámina de 6 metros de largo por 70 cm de ancho y las curvaturas del piso se mandaron diseñar con corte plasma, todas estas laminas mencionadas anteriormente fueron unidas para la formación de la cuba mediante soldadura el proceso de soldadura no especificado por la empresa.

Cabe aclarar que las láminas sometidas a doblado en frío seguidamente no fueron sometidas a un alivio de tensiones lo cual nos afirma que los extremos de la cuba presenta una acumulación de esfuerzos residuales.

Ya fabricada la cuba se puso en funcionamiento, los lingotes de zinc puro se introdujeron en la cuba para pasar a su estado líquido mediante un calentamiento hasta alcanzar los 450°C durante dicho aumento de la temperatura se presentaron cambios bruscos de esta los cuales no afectaron el comportamiento del zinc ni del acero de la cuba pues estas variaciones nunca sobrepasaron los 430°C según la información suministrada por la empresa.

Finalmente después de 2 meses de buen funcionamiento los operarios de la cuba estaban revolviendo el zinc cuando sintieron la penetrando el material de la cuba con el palo que estaba realizando dicha actividad, inmediatamente comunicaron lo ocurrido y se ordenó sacar la cuba de funcionamiento.

Las muestras analizadas para obtener una explicación del fenómeno ocurrido fueron extraídas de la sección de la cuba que estuvo sometida a deformación en frío durante su conformado, además de haber estado sometida a un proceso de soldadura, en la Figura 30 se puede observar el diseño de la cuba y la sección de la que se tomaron las muestras analizadas.

Figura 30. Cuba GALVANIZADOS GARCIA S.A



FUENTE: Autora

A estas muestras se les realizó un análisis por microscopía óptica, en la Figura 31 se puede apreciar la variación microestructural que presenta el acero empleado para la fabricación de la cuba observándose una microestructura diferente entre el acero y la capa de zinc causando interés, por tal motivo se realizó un análisis de Espectroscopia de Energía Dispersa (EDS) en dicha zona, para realizar un análisis químico elemental y concluir un posible fenómeno.

Figura 31. Cambio microestructural del borde hacia el centro de la cuba a 50X, atacada con nital

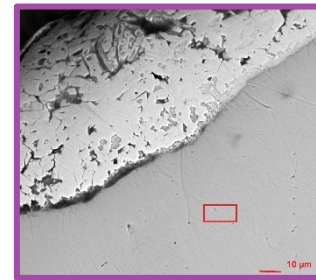
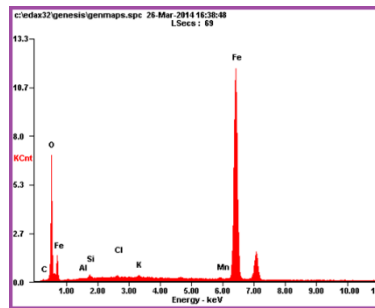


FUENTE: Autora

En la Figura 32 se ven los resultados del análisis de Espectroscopia de Energía Dispersa (EDS) tomado en la zona donde el acero presenta un cambio microestructural diferente al esperado, dicho análisis nos afirma la presencia de un elevado porcentaje de carbono siendo este un posible endurecimiento superficial que presentaba el material al ser adquirido o un efecto secundario del material al estar en contacto permanente con el zinc a temperatura constante. De esto podemos decir que al presentarse una zona endurecida ya sea por un tratamiento superficial aplicado o efectos secundarios del material por contacto permanente con el zinc los límites de grano en esta área presentaran un comportamiento de inestabilidad permitiendo la entrada del zinc por dichos límites dando inicio al fenómeno de fragilización por galvanizado.

Figura 32. Análisis de espectroscopia de energía dispersa zona de interés cuba

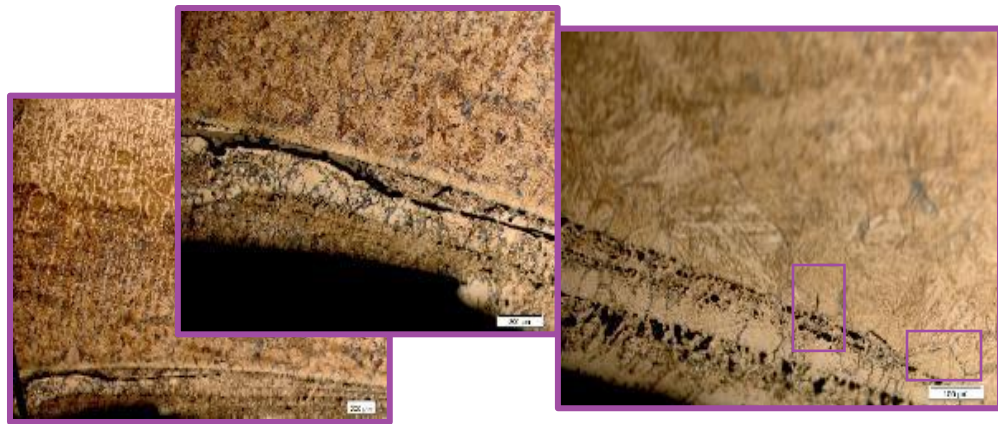
Element	Wt%	At%
CK	01.42	03.64
OK	29.91	57.64
AlK	00.25	00.29
SiK	00.84	00.92
ClK	00.35	00.30
KK	00.35	00.28
MnK	00.53	00.29
FeK	66.36	36.64
Matrix	Correction	ZAF



FUENTE: Autora

La presencia de agrietamiento se puede observar detalladamente en la Figura 33 sobre la micrografía tomada a 200X la cual nos evidencia la presencia de una pequeña grieta intergranular afirmándonos que una capa endurecida facilita el fenómeno de fragilización por metal líquido y siento este culminado gracias a la presencia de esfuerzo residuales generados durante el conformado de la curvatura de la pieza y la soldadura aplicada cercana a esta zona; igualmente en esta figura se observa un desprendimiento profundo del zinc producto del retiro rápido al que fue sometido el metal líquido al momento de fallar la cuba.

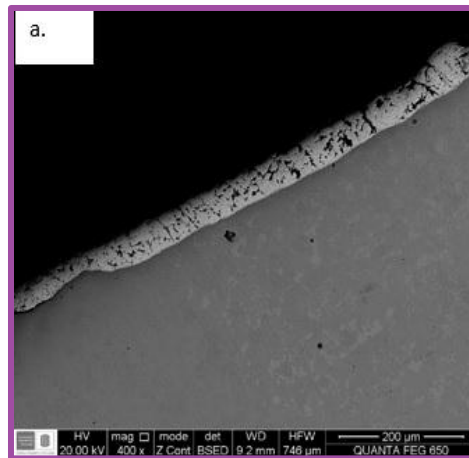
Figura 33. Micrografía de la cuba a 50X, 100X y 200X. Atacada con Picral



FUENTE: Autora.

En la Figura 34 se pueden observar la micrografía obtenida mediante microscopia electrónica de barrido SEM, la muestra analizada mediante este método es la misma que se analizó mediante microscopia óptica, la cual cabe aclarar que fue extraída de una zona donde se presume una deformación plástica intensa por efecto del doblado al que fue sometida la lámina para dar la curvatura a la pieza. En la Figura 34 se percibe la falta de homogeneidad en el recubrimiento y como el zinc se va corrompiendo el material base (acero SAE 1040) siendo esta una respuesta directa a la fragilización por galvanizado, donde influye la selección del material, el baño líquido de zinc, los tiempos de contacto del Zn y el Fe y los esfuerzos residuales presentes en la pieza.

Figura 34. Micrografía por microscopia electrónica de barrido SEM de la cuba



FUENTE: Autora.

3.10 COMPARACIÓN DE MUESTRAS DEFORMADAS PLASTICAMENTE

En la tabla 7 se ve una comparación de micrografías de las probetas deformadas, soldadas y una sin deformación, en dicha tabla se observa el efecto de la deformación plástica sobre la fragilización por galvanizado notándose las probetas de flexión y torsión son unas de las que mejor comportamiento presentan frente a ello en comparación con la probeta sin deformación plástica. Por lo contrario la probeta sometida a tracción presenta un comportamiento muy parecido al de la probeta sin deformación esto se debe a la poca deformación plástica que aplico a este ensayo mecánico. La probeta soldada es sin duda la muestra que presenta el mejor comportamiento demostrando que la fragilización por galvanizado está ligada a estructuras metálicas soldadas seguidamente galvanizadas.

Tabla 7. Comparación del comportamiento del acero SAE 1020 en diferentes mecanismos de deformación plástica

Comportamiento del acero ASE 1020 en diferentes mecanismos de deformación plástica		
		
Probeta sin deformación plástica		Probeta A ₂ ensayo de tracción
		
Probeta C ₃ ensayo de torsión	Probeta H ₃ ensayo de flexión	Probeta M ₂ soldada con electrodo 6013

FUENTE: Autora.

4. CONCLUSIONES

- ✓ Para la presente investigación se emplearon probetas de acero SAE 1020 que fueron sometidas a diferentes ensayos mecánicos y porcentajes de deformación y posteriormente se sometieron a un proceso de galvanizado para la obtención de los recubrimientos. Mediante el estudio realizado no fue posible obtener las mejores condiciones de adherencia del recubrimiento debido a que a medida que aumentaba la deformación, también lo hacía el desprendimiento del mismo. Esto es debido a las deformaciones superficiales presentes en el material que originaron, en la mayoría de probetas, una serie de grietas longitudinales a lo largo del recubrimiento. Estas grietas se presentaron en la zona donde se genera la aleación hierro/zinc la cual es la más frágil y propensa para que se dé inicio al fenómeno de fragilización por galvanizado.

- ✓ Mediante las técnicas de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido se encontró que a mayor deformación, mayor es la tendencia al agrietamiento en el recubrimiento porque causa el aumento en la cantidad de esfuerzos residuales generados en el material. Así mismo, esto provoca inestabilidad en el recubrimiento y la pieza, debido a que el zinc llega hasta las zonas donde hay concentración de esfuerzos generados a partir de los ensayos mecánicos y se da inicio al fenómeno de fragilización por galvanizado, donde la influencia de la deformación plástica es primordial para que este ocurra.

- ✓ Las deformaciones plásticas aplicadas afectan directamente el comportamiento del acero ya que al estar en contacto con el metal líquido de zinc generan la aparición de pequeñas microgrietas en la interface del acero-zinc; es decir, se manifiesta el fenómeno de fragilización de metal líquido FML, corroborando que

a mayor deformación mayor será la aparición y pronunciación de estas en el recubrimiento.

- ✓ Las técnicas de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido evidencia sobre las probetas de acero SAE 1020 soldadas con electrodos E7018 y E6013 un mayor comportamiento frente al fenómeno de fragilización por metal líquido pues estas tienen mayor tendencia a la formación de esfuerzos residuales, al cumplir esto y teniendo en cuenta el tipo de acero y el baño de galvanizado se genera la formación de grietas intergranulares presentando una fragilización en la pieza.

5. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda realizar nuevamente ensayos mecánicos como lo son tracción, torsión y flexión a un acero SAE 1020, aumentando las deformaciones finales obtenidas, para poder generar una mayor cantidad de esfuerzos residuales dentro del material y así seguir afirmando nuestra teoría sobre la influencia de la deformación plástica sobre la fragilización por galvanizado.
- ✓ Realizar ensayos de deformación plástica como lo son tracción, torsión y flexión a un acero SAE 1020 dentro del baño líquido con el fin de observar con mayor claridad el fenómeno LMAC.
- ✓ Analizar probetas sometidas a procesos de conformado como lo son laminado y doblado en frío para seguir evidenciando el efecto que tienen los esfuerzos residuales obtenidos por esos métodos al estar en contacto con el baño líquido de zinc.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM.** Stand Practice for Preparation of Metallographic Specimens ASTM E3-01-2010
- [2] **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM.** Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility ASTM E290
- [3] **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM.** Standart Test Methods and Definitions for Mechanical Testinhg of Steel Products ASTM A370-2007
- [4] **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM.** Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM E8-2012
- [5] **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM.** Standard Test Method for Torsion Testing of Wire, ASTM 938-2007
- [6] **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM.** Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products. ASTM A123/A123/M-2012
- [7] **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM.** Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. ASTM E407-2007
- [8] **AMERICAN WELDING SOCIETY AWS.** Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding AWS A5.5/A5.5M-2006
- [9] **AMERICAN WELDING SOCIETY AWS.** Specification for carbón Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding AWS A5.1/A5.1M -2006

[10] AMERICAN WELDING SOCIETY AWS. Structural Welding Code-Steel AWS D1.1/D1.1M-2006

[11] CARPIO, J. , ÁLVAREZ, J. A. , CASADO, J.A. y GUTIÉRREZ-SOLANA, F. Anuales de Mecánica de la Fractura: Corrosión bajo tensión de aceros estructurales sumergidos en baños de galvanización. Santander (España): División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Universidad de Cantabria. 2006. Vol. I.

[12] CARPIO, J. , ÁLVAREZ, J. A. , CASADO, J.A. y GUTIÉRREZ-SOLANA, F. Anuales de Mecánica de la Fractura: Diseño y validación de un utensilio para ensayos de tracción y fractura de probetas sumergidas en Zn líquido. Santander (España): División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Universidad de Cantabria. 2006. Vol. I.

[13] CARPIO, J. , ÁLVAREZ, J. A. , CASADO, J.A. y GUTIÉRREZ-SOLANA, F. Anuales de Mecánica de la Fractura: Factores de influencia en los mecanismos de fallo de aceros estructurales galvanizados. Santander (España): División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Universidad de Cantabria. 2007. Vol. I.

[14] CARPIO, J. , ÁLVAREZ, J. A. , CASADO, J.A. y GUTIÉRREZ-SOLANA, F. Engineering Failure Analysis: Environmental factors in failure during structural steel hot-dip galvanizing. Santander (España): División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Universidad de Cantabria. 2007.

[15] CARPIO, J. , ÁLVAREZ, J. A. , CASADO, J.A. y GUTIÉRREZ-SOLANA, F. Mecanismos de fallo de aceros estructurales durante la galvanización en caliente, X CONGRESO NACIONAL DE MATERIALES (Donostia - San Sebastián, 18-20 Junio 2008). Memorias del congreso.

[16] CARPIO, J. , ÁLVAREZ, J. A. , CASADO, J.A. y GUTIÉRREZ-SOLANA, F. Research Fund for Coal and Steel: Failure mechanisms during galvanising. Santander (España): División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Universidad de Cantabria. 2007.

[17] CHARMAIN, C. Galvanizing structural steelwork: The management of liquid metal assisted cracking. BCSA and GA Publication num. 40/05, first ed. ISBN 0850730481.

[18] DIETER, GEORGE E. Mechanical Metallurgy. McGraw Hill Book Company. SI metric edition 1988.

[19] FELDMAN, M.; Hot-dip-zinc-coating of prefabricated structural steel components; JRC Scientific and Technical Reports; European Commission; EUR 24286 EN.

[20] HOT DIP GALVANIZED COATINGS; in: Metals Handbook, V.5, Surface Cleaning, Finishing, and Coating; ASM International; E.E.U.U; pp.323-332; 1982.

[21] JAMES, Neil. Engineering Failure Analysis: Designing against Imac in galvanised steel structures. Plymouth: School of Engineering, University of Plymouth. 2008.

[22] JAMES, Neil. Engineering Failure Analysis: Residual stress influences on structural reliability. Plymouth: School of Engineering, University of Plymouth. 2011.

[23] PRIESTLEY, Kate. Standing Committee on Structural Safety: Liquid metal assisted cracking of galvanised steelwork. London (England): British Constructional Steelwork Association and the Galvanisers' Association. 2005.

[24] KINSTLER, Thomas. GalvaScience: Current knowledge of the cracking of steels during galvanizing. Springville: Synthesis of the Available Technical Literature and Collective Experience for the American Institute of Steel Construction.

[25] KUMAR, Amit. Journal of Materials Processing Technology: Formability of galvanized interstitial-free steel sheets. New Delhi (India). Department of Mechanical Engineering: Indian Institute of Technology. 2005.

[26] LIQUID-METAL EMBRITTLEMENT; in: Metals Handbook, V.11, Failure Analysis and Prevention; ASM International; E.E.U.U; pp.225-244; 1986.

[27] MARDER, A.R. Progress in Materials Science: The metallurgy of zinc-coated steel. Bethlehem (USA): Department of Materials Science and Engineering, Lehigh University. 2000.

[28] MRAZ, L., LESAY J. Problems with reliability and safety of hot dip galvanized steel structures. Bratislava (Slovakia): Welding Research Institute, Industrial Institute SR. 2009.

[29] MUSSINI, R., GONZÁLEZ, M., VEDOVATTI, E., DELLA MEA, L. Instituto de Ensayo de Materiales, Revisión sobre el fenómeno de fragilización por metal líquido. Montevideo (Uruguay): Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.

[30] NORMA TECNICA COLOMBIANA. Siderurgia: PRÁCTICA PARA PROTECCIÓN CONTRA LA FRAGILIZACIÓN DE PRODUCTOS DE ACERO ESTRUCTURAL GALVANIZADOS POR INMERSIÓN EN CALIENTE Y PROCEDIMIENTO PARA DETECTAR LA FRAGILIZACIÓN. NTC 3242. Bogotá, Colombia.1991.

[31] Rädeler, W., “Die Erzeugung von Spannungsrissen in Stahl durch flüssiges Zink”. “Stahl und Eisen”, 73, No.10. Dusseldorf, Alemania, 1953. pp. 654-658.

[32] ROA, Isidoro Alejandro. Estudio del comportamiento mecánico ante deformaciones y vibraciones de recubrimientos de galvanizado obtenidos por inmersión en caliente en baños con contenidos variables de níquel y aluminio. Chile. 2004. 104h. Trabajo de grado (Ingeniero civil metalúrgico) Universidad de Concepción, Facultad de ingeniería, Departamento de ingeniería metalúrgica.

[33] Rudd, W. Failure mechanisms during galvanizing; EUROPEAN COMMISSION, Directorate-General for Research; EUR 23195 EN; pp. 52; 2008

[34] VAGGE, S.T., RAJA, V.S., GANESH NARAYANAN, R. Corrosion Science and Engineering: Effect of deformation on the electrochemical behavior of hot-dip galvanized steel sheets, Bombay (India): Department of Metallurgical Engineering and Materials Science, Indian Institute of Technology Bombay. 2007.

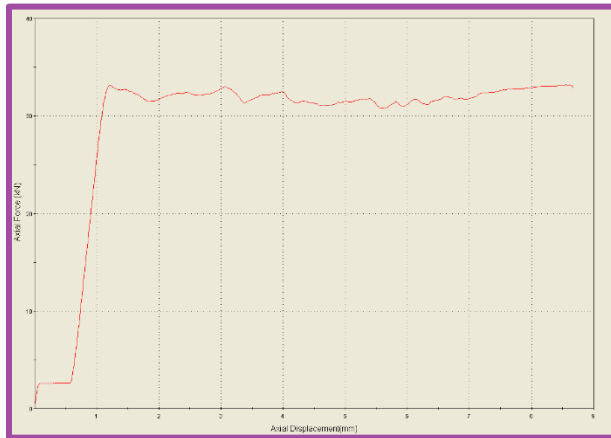
[35] VALENCIA, G. Asdrúbal. Tecnología del tratamiento térmico de los metales.

ANEXOS

Anexo A. Resultados del ensayo de tracción

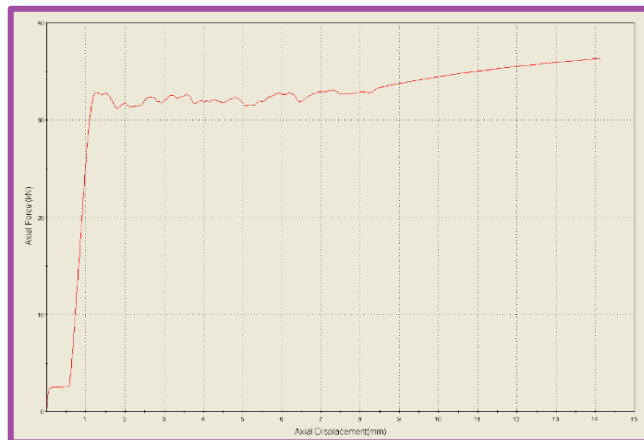
- Muestra A₂

Figura A.1. Desplazamiento Axial Vs Carga Axial



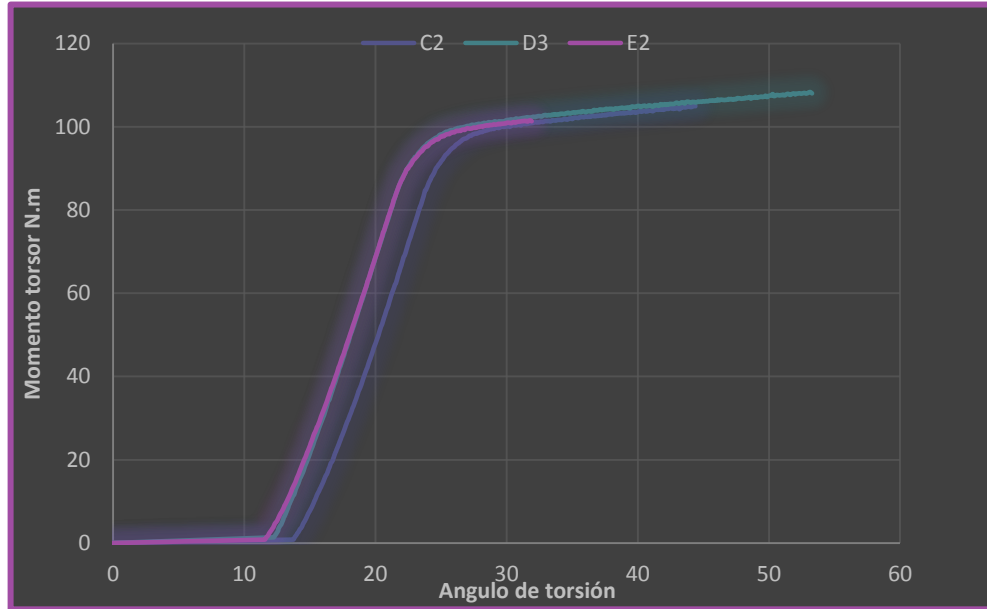
- Muestra B₂

Figura A.2. Desplazamiento Axial Vs Carga Axial



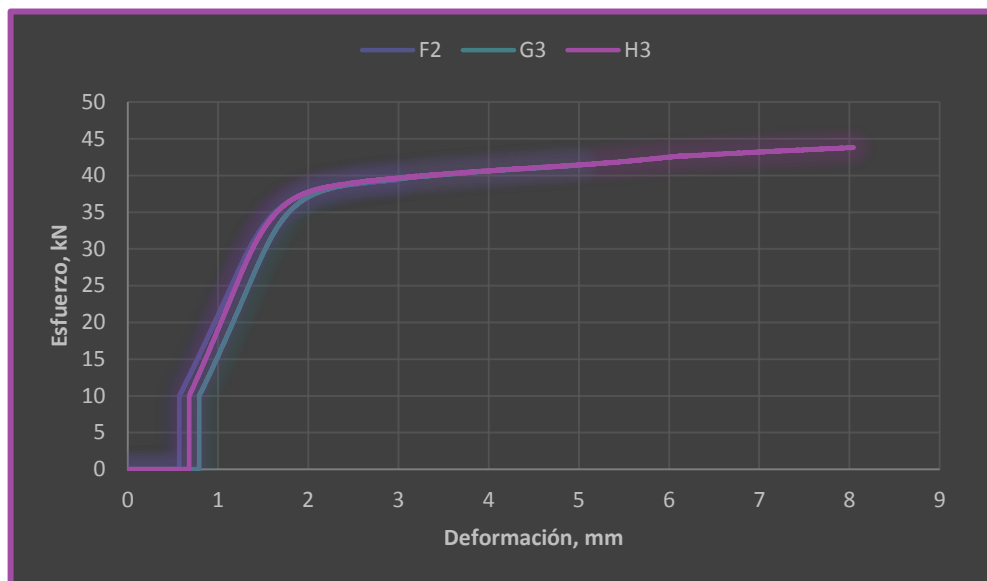
Anexo B. Resultados del ensayo de torsión.

Figura B. Ensayo de torsión. Momento torsor Vs ángulo de torsión



Anexo C. Resultados del ensayo de flexión

Figura C. Ensayo de flexión. Carga aplicada Vs deformación.



Anexo D. Cálculos para porcentajes de deformación

- Ensayo de tracción

Para obtener el porcentaje de deformación que obtuvo cada probeta se utiliza la ecuación 1:

$$\%E = \ln \frac{L}{L_0} * 100 \quad [1]$$

Para la probeta **A₂** se tiene:

$$\%E_{A2} = \ln \frac{168,5}{160} * 100 \quad \%E_{A2} = 5,17\%$$

- Ensayo de torsión

Para obtener el porcentaje de deformación angular que obtuvo cada probeta se utiliza la ecuación 2:

$$\varphi = \frac{r * \theta}{L} \quad [2]$$

Para la probeta **C₂** se tiene:

$$\varphi = \frac{5 * 44,5}{105} \quad \varphi = 2,11^\circ$$

- Ensayo de flexión

Para obtener el porcentaje de deformación que obtuvo cada probeta se utiliza la ecuación 3:

$$\%\varepsilon = \frac{6D * \Delta L}{L^2} * 100 \quad [3]$$

Para la probeta **C₂** se tiene:

$$\%\varepsilon = \frac{6 * 38,2 * 3,402}{160^2} \quad \varepsilon = 3 \%$$

Anexo E. Reactivos Químicos

Reactivo	Composición Química	Variable
Nital	1-5 ml. HNO ₃ 100 ml. Etanol o metano (95%)	Tiempo: 5-10 s.
Picral	4gr. Ácido pícrico 100 ml. Etanol o metano (95%)	Tiempo: 5-10 s.