ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA INGENIERÍA MECÁNICA

"CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA Y EVALUACIÓN DEL PERFIL DE DUREZA EN UNA JUNTA SOLDADA DE ACERO ASTM A36 MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN ROTACIONAL"

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para obtener el grado académico de:

INGENIERA MECÁNICA

AUTORA:

ANDREA CAROLINA HUARACA LOPEZ

Riobamba – Ecuador

2022

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA INGENIERÍA MECÁNICA

"CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA Y EVALUACIÓN DEL PERFIL DE DUREZA EN UNA JUNTA SOLDADA DE ACERO ASTM A36 MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN ROTACIONAL"

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para obtener el grado académico de:

INGENIERA MECÁNICA

AUTORA: ANDREA CAROLINA HUARACA LOPEZ

DIRECTOR: Ing. CARLOS OSWALDO SERRANO AGUIAR

Riobamba – Ecuador

2022

©2022, Andrea Carolina Huaraca Lopez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, ANDREA CAROLINA HUARACA LOPEZ declaro que el presente trabajo de integración curricular es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos. Los textos redactados en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos del trabajo de integración curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 14 de enero de 2022

Andrea Carolina Huaraca Lopez

060409990-3

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA INGENIERÍA MECÁNICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: el Trabajo de Integración Curricular: Tipo: Proyecto Técnico, **"CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA Y EVALUACIÓN DEL PERFIL DE DUREZA EN UNA JUNTA SOLDADA DE ACERO ASTM A36 MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN ROTACIONAL"** realizado por la señorita **ANDREA CAROLINA HUARACA LOPEZ**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

	FIRMA	**FECHA**
Ing. M.Sc. Edwin Fernando Viteri Núñez **PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**	EDWIN FERNANDO VITERI NUNEZ Firmado digitalmente por EDWIN FERNANDO VITERI NUNEZ Fecha: 2022.02.20 17:54:13 -05'00'	2022-01-14
Ing. Carlos Oswaldo Serrano Aguiar **DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**	CARLOS OSWALDO SERRANO AGUIAR Firmado digitalmente por CARLOS OSWALDO SERRANO AGUIAR Fecha: 2022.02.18 09:55:00 -05'00'	2022-01-14
Ing. Miguel Ángel Escobar Guachambala **MIEMBRO DEL TRIBUNAL**	MIGUEL ANGEL ESCOBAR GUACHAMBALA Digitally signed by MIGUEL ANGEL ESCOBAR GUACHAMBALA	2022-01-14

DEDICATORIA

A mis padres Martha y Javier quienes con su sacrificio y apoyo incondicional me han permitido cumplir una de las más anheladas metas de mi vida, en especial a mi madre por fomentar en mí el ejemplo de responsabilidad, respeto y trabajo honesto. A mis hermanos Mateo y Matías, que han llenado de alegría mi vida con sus juegos. Finalmente, a toda mi familia tíos, tías y primos quienes con su confianza y cariño que me han ayudado a crecer profesional y personalmente.

Andrea

AGRADECIMIENTO

A mis padres y hermanos quienes han sido la razón por la cual he podido cumplir mis objetivos a pesar de las dificultades que hemos tenido que atravesar.

A mis amigos que con su apoyo y colaboración durante el transcurso de la carrera han convertido al a esta en una experiencia digna de recordar. A mis profesores que fueron la base de los conocimientos de formación como profesional en especial al Ing. Carlos Serrano por su predisposición y gran poyo para la realización de este trabajo.

Finalmente, a la ESPOCH, por todo lo que me ha brindado durante mi proceso de formación.

Andrea

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS……..……...……...**x**
ÍNDICE DE FIGURAS……..…….....**xii**
ÍNDICE DE GRÁFICOS…….…...……...**xiii**
ÍNDICE DE ANEXOS….……...……...…...…….**xiv**
RESUMEN…….……...……..**xv**
SUMMARY….…….....……...……. **xvi**
INTRODUCCIÓN……...……..…….…1

CAPÍTULO I

1. **DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA**……..……..... 2
1.1. **Antecedentes**……..…….….... 2
1.2. **Delimitación**……..…..……..... 3
1.2.1. ***Delimitación espacial***……...…..…….….…...3
1.2.2. ***Delimitación sectorial***……...……....…….....3
1.3. **Formulación del problema**……....…….……...3
1.4. **Objetivos**……....…….....4
1.4.1. ***Objetivo general***……....….…… 4
1.4.2. ***Objetivos específicos***……...……....……... 4

CAPÍTULO II

2. **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**…….…….……...….…..5
2.1. **Sociedad Americana de Soldadura**….……...…...5
2.2. **Manual de soldadura**…..……...……...….5
2.3. **Soldadura en estado sólido**……..…….....6
2.4. **Soldadura por fricción**…..……...……..6
2.4.1. ***Tipos***….……...……... 7
2.5. **Soldadura por fricción rotacional**……..……...……8
2.5.1. ***Fases del proceso***……..……...……9
2.5.1.1. *Etapa 1. Contacto inicial*..……...……9
2.5.1.2. *Etapa 2. Fricción*…….…… 9
2.5.1.3. *Etapa 3. Forja*…….……9

2.5.2. ***Factores de influencia***……10
2.5.3. ***Zonas de afectación térmica***……..10
2.5.4. ***Uniones***…….….. 11
2.5.5. ***Soldabilidad***…….…... 12
2.5.6. ***Aplicación***……... 13
2.5.7. ***Ventajas del proceso***……...14
2.5.8. ***Limitaciones del proceso***……14
2.6. **Métodos de entrada de energía**……15
2.6.1. ***Soldadura por fricción inercial (Inertia – drive friction rotary welding)***…...15
2.6.1.1. *Velocidad periférica*……... 16
2.6.1.2. *Presión axial*…….....16
2.6.1.3. *Tamaño del volante*……...16
2.6.2. ***Soldadura por fricción directa- (Direct – drive friction rotary welding)***……16
2.6.2.1. *Velocidad rotacional*……...17
2.6.2.2. *Presión*……..17
2.6.2.3. *Tiempo de calentamiento*……18
2.7. **Selección de parámetros**……..19
2.8. **Acero ASTM A-36**……20
2.8.1. ***Propiedades mecánicas***……..20
2.8.2. ***Propiedades químicas***…… 21
2.9. **Ensayos no destructivos**……21
2.9.1. ***Inspección visual***……21
2.10. **Ensayos destructivos**……22
2.10.1. ***Dureza***…….. 22
2.10.2. ***Métodos de obtención de la dureza***……22
2.10.2.1. *Ensayo Brinell*……... 22
2.10.2.2. *Dureza Rockwell*……23
2.10.2.3. *Ensayo Vickers y Knoop*……..23
2.11. **Caracterización metalográfica**……...24
2.11.1. ***Extracción***…… 24
2.11.2. ***Desbaste y pulido***……24
2.11.3 ***Ataque químico***…… 25
2.11.4 ***Metalografía***…….....26

CAPÍTULO III

3. **MARCO METODOLÓGICO**…….. 27

3.1. **Equipos**……..……. 27

3.1.1. ***Torno ZMM SLIVEN CU 400***...…… 27

3.1.2. ***Equipo de sujeción para ensayos de soldadura por fricción***…….……28

3.1.3. ***Prácticas de seguridad***..…….…….29

3.1.4. ***Pirómetro portátil RAYTEK RAYNGER 3I PLUS***…….……...29

3.2. **Materiales**……... 30

3.2.1. ***Probetas para ensayo***….…….…… 30

3.3. **Procedimiento de análisis**…….…….……..……..30

3.4. **Preparación de las probetas**…….……31

3.5. **Parámetros de soldadura**…….. 32

3.6. **Etapas de soldadura**……...…… 33

3.6.1. ***Fase 1. Primer contacto***…….……33

3.6.2. ***Fase 2. Fase de fricción***…….……34

3.6.3. ***Fase 3. Fase de paro***…….…….. 34

3.6.4. ***Fase 4. Fase de soldadura***…….. 35

3.7. **Proceso de soldadura**…….……35

3.7.1. ***Análisis experimental***……. 35

3.7.2. ***Análisis final***……... 36

3.8. **Inspección visual**…… 39

3.9. **Metodología para el análisis metalográfico**…….…… 39

3.9.1. ***Norma***……..……39

3.9.2. ***Equipo***…….…… 39

3.9.3. ***Micrografía***……. 40

3.10. **Metodología para la realización de ensayos de dureza**…….. 40

3.10.1. ***Dureza Vickers***…….……... 40

3.10.1.1. *Norma*…….. 40

3.10.1.2. *Equipo*…….. 40

3.10.1.3. *Probeta*……..…... 41

CAPÍTULO IV

4. **RESULTADOS**…….. 42

4.1. **Inspección visual**…… 42

4.2. **Análisis metalográfico**……...…… 43
4.3. **Dureza Vickers**.……..……..……...74
4.3.1. ***Cálculo de la dureza***……... 74
4.3.2. ***Perfil de dureza***……... 74
4.3.3. ***Perfil de dureza promedio***…….. 76
CONCLUSIONES……..78
RECOMENDACIONES……80
BIBLIOGRAFÍA
ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Procesos de soldadura en estado sólido……..……..……6
Tabla 2-2: Tipos de soldaduras por fricción……...……7
Tabla 3-2: Zonas que se presentan en el proceso de soldadura……...……11
Tabla 4-2: Áreas de aplicación de la soldadura por fricción……...……14
Tabla 5-2: Uniones entre el mismo material para ejes de 25mm……..…..... 19
Tabla 6-2: Unión entre materiales distintos para ejes de 25mm…… 20
Tabla 7-2: Propiedades mecánicas acero ASTM A36…….....20
Tabla 8-2: Requerimientos químicos del acero ASTM A-36…….……21
Tabla 9-2: Resumen de ensayos de dureza……...……..….... 23
Tabla 10-2: Soluciones utilizadas para ataque químico…….…..… 26
Tabla 1-3: Características técnicas del torno ZMM SLIVEN CU 400x2000……..…28
Tabla 2-3: Parámetros referenciales iniciales de soldadura……..……. 32
Tabla 3-3: Parámetros finales de soldadura……..…. 33
Tabla 4-3: Análisis experimental de las probetas……..… 36
Tabla 5-3: Análisis final de las probetas a 1000 RPM…….…… 37
Tabla 6-3 Análisis final de las probetas a 1250 RPM…….…… 38
Tabla 7-3 Análisis final de las probetas a 1500 RPM…….…… 38
Tabla 1-4: Probetas ensayadas a 1000 RPM, descartadas por inspección visual…..…. 42
Tabla 2-4: Probetas ensayadas a 1250 RPM, descartadas por inspección visual…..…. 43
Tabla 3-4: Probetas ensayadas a 1500 RPM, descartadas por inspección visual…..…. 43
Tabla 4-4: Micrografía del material base. Probeta 1000-5……... 46
Tabla 5-4: Micrografía de la zona de transición entre ZM y ZTA. Probeta 1000-5..… 46
Tabla 6-4: Micrografía de la zona ZTA. Probeta 1000-5…….…. 47
Tabla 7-4: Micrografía de la zona ZTMA. Probeta 1000-5……..…47
Tabla 8-4: Micrografía de la zona ZM. Probeta 1000-5……... 48
Tabla 9-4: Micrografías de la probeta 1000-2……... 49
Tabla 9-4: Micrografías de la probeta 1000-2 (Continuación)…….. 50
Tabla 9-4: Micrografías de la probeta 1000-2 (Continuación)…… 51
Tabla 10-4: Micrografías de la probeta 1000-3…….. 51
Tabla 10-4: Micrografías de la probeta 1000-3 (Continuación)…… 52
Tabla 10-4: Micrografías de la probeta 1000-3 (Continuación)…… 53
Tabla 11-4: Micrografías de la probeta 1000-5…….. 54
Tabla 11-4: Micrografías de la probeta 1000-5 (Continuación)…… 55

Tabla 11-4: Micrografías de la probeta 1000-5 (Continuación)……. 56
Tabla 12-4: Micrografías de la probeta 1250-1…….. 56
Tabla 12-4: Micrografías de la probeta 1250-1 (Continuación)……. 57
Tabla 12-4: Micrografías de la probeta 1250-1 (Continuación)……. 58
Tabla 13-4: Micrografías de la probeta 1250-3…….. 59
Tabla 13-4: Micrografías de la probeta 1250-3 (Continuación)……. 60
Tabla 13-4: Micrografías de la probeta 1250-3 (Continuación)……. 61
Tabla 14-4: Micrografías de la probeta 1250-4…….. 61
Tabla 14-4: Micrografías de la probeta 1250-4 (Continuación)……. 62
Tabla 14-4: Micrografías de la probeta 1250-4 (Continuación)……. 63
Tabla 15-4: Micrografías de la probeta 1500-2…….. 64
Tabla 15-4: Micrografías de la probeta 1500-2 (Continuación)……. 65
Tabla 15-4: Micrografías de la probeta 1500-2 (Continuación)……. 66
Tabla 16-4: Micrografías de la probeta 1500-3…….. 66
Tabla 16-4: Micrografías de la probeta 1500-3 (Continuación)……. 67
Tabla 16-4: Micrografías de la probeta 1500-3 (Continuación)……. 68
Tabla 17-4: Micrografías de la probeta 1500-4…….. 69
Tabla 17-4: Micrografías de la probeta 1500-4 (Continuación)……. 70
Tabla 17-4: Micrografías de la probeta 1500-4 (Continuación)……. 71
Tabla 18-4: Tabla comparativa, zona de afectación térmica respecto a la velocidad de ensayo……..…… 72
Tabla 18-4: Tabla comparativa, zona de afectación térmica respecto a la velocidad de ensayo (Continuación)……..…….. 73
Tabla 19-4: Microdureza Vickers…….…….. 74
Tabla 20-4: Microdureza Vickers promedio……..…… 76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2: Proceso de soldadura por fricción…….....…… 6
Figura 2-2: Fases del proceso de soldadura por fricción lineal…….……...…...7
Figura 3-2: Soldadura por fricción – agitación……...……...…8
Figura 4-2: Soldadura por fricción rotacional……...…… 8
Figura 5-2: Etapas de la soldadura FR……...…….…….. 10
Figura 6-2: Zonas térmicas de la soldadura por fricción rotacional……..……11
Figura 7-2: Uniones típicas para juntas de soldadura por fricción……...……12
Figura 8-2: Soldabilidad de materiales……..……13
Figura 9-2: Características y parámetros de la soldadura por inercia……...…… 15
Figura 10-2: Características y parámetros de la soldadura por fricción directa……...…...17
Figura 11-2: Muestras en baquelita (izquierda), muestras en resina (derecha)……...…24
Figura 12-2: Esquematización de desbaste……..…25
Figura 1-3: Torno ZMM SLIVEN CU 400x2000……...……..… 28
Figura 2-3: Portabrocas del torno ZMM SLIVEN CU 400x2000……..…28
Figura 3-3: Pirómetro portátil RAYTEK RAYNGER 3I PLUS……..……..……29
Figura 4-3: Procedimiento de análisis de la soldadura…….……..……...30
Figura 5-3: Esquema de las probetas para ensayo…….……..……..31
Figura 6-3: Probeta para el cabezal móvil…….……..…..32
Figura 7-3: Probeta para el mandril…….……..…32
Figura 8-3: Fase previa al primer contacto……...……...……..33
Figura 9-3: Fase del primer contacto……..…….……..33
Figura 10-3: Fase de fricción……..……34
Figura 11-3: Fase de paro……...……34
Figura 12-3: Fase de soldadura……..……..35
Figura 13-3: Probeta ensayada en proceso experimental (abajo) y en proceso final (arriba)….…….…… 37
Figura 14-3: Microscopio óptico……..……...39
Figura 15-3: Equipo de microdureza Vickers……..... 40
Figura 16-3: Perfil de la probeta para el ensayo Vickers……... 41
Figura 1-4: Zonas de afectación térmica……...…….…... 44
Figura 2-4: Comparación entre ZM (a) y ZTA (b). Probeta 1000-5 magnificación 200x...44
Figura 3-4: Comparación entre ZTMA (a) y ZM (b). Probeta 1000-5 magnificación 200x…….... 45

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-2: Relación entre el tiempo de calentamiento y la presión de fricción..….....18
Gráfico 2-2: Relación entre la deformación axial y la presión de fricción……..……....19
Gráfico 1-4: Perfil de dureza para una velocidad de ensayo de 1000 RPM…….…….. 75
Gráfico 2-4: Perfil de dureza para una velocidad de ensayo de 1250 RPM…….…….. 75
Gráfica 3-4: Perfil de dureza para una velocidad de ensayo de 1500 RPM…….…….. 76
Gráfica 4-4: Perfil de dureza promedio según la velocidad de ensayo……..…….77

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: MEDIDAS DE LAS IDENTACIONES DE DUREZA VICKERS

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue realizar el análisis metalográfico de una junta de acero estructural ASTM A36 soldada por un proceso de fricción rotacional y determinar el perfil de dureza de los ensayos realizados a 1000RPM, 1250RPM y 1500RPM. El estudio se realizó utilizando un torno convencional dispuesto con un sistema de embrague y paro de emergencia y se dividió en dos etapas de análisis, una experimental y una de análisis final que se repitieron con cada una de las velocidades mencionadas, en donde, una de las barras de acero de 14mm de diámetro se montó en el mandril siendo el elemento móvil mientras que la otra como elemento fijo se montó en el portabrocas. Los parámetros controlados fueron la velocidad angular, el tiempo de fricción entre las barras y el avance longitudinal que el elemento fijo tuvo para mantener a las superficies en contacto, además se utilizó un pirómetro digital para registrar la temperatura máxima alcanzada en el proceso. Se realizó una inspección visual a las probetas ensayadas de acuerdo a lo que indica la AWS en su Welding Handbook, seleccionando las adecuadas para los análisis siguientes. En cada una de estas, se identificó la zona de afectación térmica y se determinó la dureza a lo largo de la misma con lo que se construyó el perfil de dureza individual y el perfil de dureza promedio por velocidad de ensayo. Se evidencia una dureza promedio de 186HV a una velocidad de 1000RPM, en la zona de fusión o mezclado del material, siendo está la más alta registrada, determinando así todos los parámetros necesarios que entreguen una buena calidad de junta. Se recomienda implementar un sistema de sujeción para la probeta estática similar al sistema de la probeta móvil para evitar así problemas de excentricidad en la unión soldada final.

Palabras clave: <SOLDADURA POR FRICCIÓN ROTACIONAL> <ACERO ASTM A36> <FASES DE SOLDADURA> <MICROGRAFÍA> <ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA> <PERFIL DE DUREZA>.

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS
DBRA
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL APRENDIZAJE
ESPOCH

Firmado electrónicamente por:
HOLGER GERMAN RAMOS UVIDIA

0256-DBRA-UPT-2022

2022-02-11

SUMMARY

The objective of the present work was to carry out the metallographic analysis of an ASTM A36 structural steel joint welded by a rotational friction process and to determine the hardness profile of the tests carried out at 1000RPM, 1250RPM and 1500RPM. The study was carried out using a conventional lathe arranged with a clutch and emergency stop system and was divided into two stages of analysis, one experimental and one final analysis, which were repeated with each of the speeds mentioned, where one of the 14mm diameter steel bars were mounted on the chuck being the moving element while the other as fixed element was mounted on the drill chuck. The controlled parameters were the angular speed, the friction time between the bars and the longitudinal advance that the fixed element had to keep the surfaces in contact, in addition a digital pyrometer was used to record the maximum temperature reached in the process. A visual inspection of the tested specimens was carried out according to what the AWS indicates in its Welding Handbook, selecting the appropriate ones for the following analyses. In each of these, the thermal affectation zone was identified and the hardness along it was determined, with which the individual hardness profile and the average hardness profile per test speed were constructed. An average hardness of 186HV is evidenced at a speed of 1000RPM, in the area of fusion or mixing of the material, being the highest recorded, thus determining all the necessary parameters that deliver a good joint quality. It is recommended to implement a fastening system for the static specimen similar to the mobile specimen system in order to avoid eccentricity problems in the final welded joint.

Keywords: <ROTATIONAL FRICTION WELDING> <ASTM A36 STEEL> <WELDING PHASES> <MICROGRAPHY> <THERMAL AFFECTED ZONE> <HARDNESS PROFILE>.

LUIS FRANCISCO MANTILLA CABRERA

Firmado digitalmente por LUIS FRANCISCO MANTILLA CABRERA
Fecha: 2022.02.16 12:35:05 -05'00'

INTRODUCCIÓN

La soldadura por fricción, se ha estado utilizando para procesos de producción en serie, enfocados en la unión de materiales clasificados como difíciles de soldar por procesos de soldadura más comunes como los procesos de soldadura por fusión. Una de las principales ventajas que ofrece este proceso es que no se requiere de una fuente adicional de calor, ni tampoco de la presencia de un material extra de aporte para lograr una unión resistente, de alta calidad y sin afección térmica considerable al material. El principio que se utiliza en la soldadura por fricción es la conversión directa de energía mecánica en energía térmica, es decir que la fricción mecánica que generan dos piezas al estar en contacto y en movimiento, genera temperaturas altas capaces de plastificar el material, pero no lo suficientemente como para fundirlos. (Raj Singh 2016)

El desarrollo del proyecto se centra en soldar dos barras de acero estructural ASTM A36 mediante soldadura por fricción rotacional controlando variables como la velocidad angular, el tiempo de fricción entre las barras y el avance longitudinal que el elemento fijo tiene respecto al móvil con el propósito de obtener la combinación correcta que pueda entregar una junta de unión soldada de alta calidad; para corroborar la calidad final de la junta se hará uso de micrografías que permitan observar los cambios microestructurales que sufre el material, además de que se realizarán ensayos de microdureza para determinar los niveles de la misma en las diferentes zonas de afectación térmica que presenta el material después de haber sido ensayado, contribuyendo con el estudio y la investigación de uno de los procesos de soldadura por fricción menos estudiados como lo es la soldadura por fricción rotacional.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

A partir de que la humanidad aprendió a trabajar con los metales, inició una práctica donde hábiles artesanos de las edades de bronce y de hierro lograban fundir, formar y alear metales de distinto origen para crear elementos necesarios para la época en que se encontraban (Jeffus, 2009, p.4). En 1991, El Instituto de Soldadura o por sus siglas en inglés TWI (*The Welding Institute*) en Cambridge – Reino Unido, presenta el proceso de soldadura por fricción FRW (*Friction Welding*) como un proceso de soldadura en estado sólido donde dos piezas son soldadas mediante fricción mecánica y sin adición de material, donde las propiedades mecánicas se veían alterando mínimamente en la zona de soldadura (Raj, 2016, p.3).

El método de soldadura por fricción se ha estado utilizando para procesos de producción en serie enfocados en la soldadura de materiales, disímiles o denominados como difíciles de soldar por procesos de fusión como lo es el bronce, cobre, titanio, magnesio, plástico y sobre todo las aleaciones de aluminio, muy comunes por su alta resistencia y aplicación en el campo automotriz y aeroespacial (López, 2013, p.7). Es así que en 1993 los laboratorios de *Marshall Space Flight Center* ubicados en Huntsville, Alabama, Estados Unidos tuvieron gran éxito en el desarrollo de una aleación denominada aluminio litio (Al-Li 2195) que logró reemplazar a la aleación Al 2219, que hasta ese entonces se utilizaba para construir los tanques externos de los transbordadores espaciales en la NASA, reduciendo el peso del tanque en 7 500 libras, respecto al modelo anterior (AWS, 2015b, p.184). De igual manera, en la Universidad Autónomas de Nueva León se realizó estudio donde se muestra el comportamiento termomecánico que presenta una funda para eje motriz sometida a proceso de soldadura por fricción y la influencia que tienen los parámetro geométricos de los materiales a soldar (Cárdenas, 2015, p.3).

Las universidades del país, como mayores centros de investigación, han publicado varios estudios referentes a este nuevo proceso. En la Universidad Politécnica Salesiana en el año 2018, se realizó un estudio donde se evaluaban las propiedades de tracción y torsión que las probetas de acero AISI 1018, AISI 1045, Aluminio y Bronce SAE 40, presentaban después de ser cometidas a ensayos de soldadura (Castro, 2018, p.1-2). Por otra parte, en la Escuela Politécnica Nacional se encuentran disponibles estudios sobre la soldabilidad y caracterización metalográfica que presentan materiales disimiles como aceros inoxidables y aceros al carbono (Chávez, 2017, p.1-2),

cobre electrolítico y aluminio (AA-6063) y aluminio 6061 (Amaguayo y Sánchez, 2017, p.3), y latón C38500 (García, 2018, p.1). Incluso se puede encontrar un análisis comparativo del comportamiento que presenta una junta soldada por fricción y una junta soldada por fricción agitación en materiales polímeros como poliamida PA-66 y Polietileno (Paucar y Suquillo, 2018, p.2). Este método de soldadura es uno de los métodos menos estudiado ya que por las características propias del proceso y las limitaciones geométricas, requiere de un control íntimo de varios factores para así lograr una buena calidad y resistencia final de la junta soldada, control que además se vuelve específico para cada material y geometría.

1.2. Delimitación

1.2.1. Delimitación espacial

El presente trabajo se desarrollará en la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo, Ecuador.

1.2.2. Delimitación sectorial

El desarrollo del proyecto se basa en el Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021, cuyo primer objetivo indica y garantiza una vida digna con iguales oportunidades para todas las personas.

1.3. Formulación del problema

Al tratarse de un método de soldadura relativamente nuevo y que aún se encuentra en fases de investigación, no goza de la misma popularidad ni aceptación que los otros métodos de soldadura, además, que no cuenta con valores de control de las variables específicos para cada material. Si bien en sus inicios la soldadura por fricción se creó para trabajar aleaciones de aluminio, algunos estudios han demostrado que esta tecnología también resulta viable para unir satisfactoriamente una amplia gama de materiales incluso si estos son disimiles.

Las temperaturas de trabajo por debajo de las de fusión de los materiales y la alta resistencia de las juntas, son las evidencias más significativas que deja la aplicación de esta tecnología, todo esto a su vez puede reflejarse mediante un análisis metalográfico que evalúa los cambios a nivel estructural que el material presenta en las diferentes zonas de afectación térmica después de ser sometido a un proceso de soldadura por fricción, adicional a esto es necesario realizar una caracterización mecánica de microdureza para evaluar los cambios en los niveles de dureza. Dicho análisis se llevará a cabo en ejes de acero estructural ASTM A36.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Realizar la caracterización metalográfica y evaluar el perfil de dureza en una junta soldada de acero ASTM A36 mediante el proceso de soldadura por fricción rotacional.

1.4.2. Objetivos específicos

- Revisar el estado del arte acerca de los procesos de soldadura por fricción.
- Identificar los parámetros de control necesarios definidos por AWS para obtener la mejor calidad final en la junta de soldadura en probetas preparadas a partir de barras de acero ASTM A36.
- Realizar el análisis macro y microestructural de las juntas soldadas en la zona de afectación térmica y sus alrededores.
- Determinar el perfil de dureza que presenta una junta soldada por fricción rotacional.
- Analizar y comparar estadísticamente los resultados obtenidos posteriormente a los ensayos.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Se presenta el estado del arte del proceso de soldadura por fricción enfocándose en la soldadura por fricción rotacional, las etapas durante el desarrollo de la soldadura y las variables de control según el método de entrada de energía que define la Sociedad Americana de Soldadura o *AWS* por sus siglas en inglés. Se muestran los diferentes métodos de obtención de dureza y finalmente se describen las actividades necesarias para realizar el análisis metalográfico de un material.

2.1. Sociedad Americana de Soldadura

La Sociedad Americana de Soldadura o por sus siglas en inglés AWS (*American Welding Society*) es una organización sin fines de lucro fundada en 1919 cuya misión se basa en "Avanzar en la ciencia, tecnología y aplicación de la soldadura y los procesos afines de unión y corte, incluida la soldadura fuerte, la soldadura y la pulverización térmica", brinda de manera constante capacitación avanzada, conferencias, colaboraciones profesionales, estándares actualizados, entre otras. El conocimiento y los recursos que la AWS brinda, son las herramientas de vanguardia que la industria necesita para alcanzar el éxito profesional y comercial (AWS, 2020, p.1).

2.2. Manual de soldadura

El manual de soldadura o *Welding Handbook* en inglés es un manual que provee información de soporte para el diseño y la aplicación de procesos de soldadura y afines. Es el resultado del esfuerzo colectivo de muchos técnicos especialistas voluntarios quienes aportaron con su conocimiento en el campo, razón por la cual la información y los datos presentados están destinados únicamente con fines informativos mas no reglamentarios (AWS, 2015, p.2). El *Welding Handbook* se compone de varios volúmenes y capítulos en los que se amplía información sobre los procesos de soldadura corte, unión y afines, cuya distribución dependerá de la edición consultada, pero de manera general los capítulos iniciales tratan de la metalurgia, la física de la soldadura y el corte, el flujo de calor en la soldadura y la tensión residual y la distorsión, mientras que los demás capítulos discuten las consideraciones de ingeniería del diseño de soldaduras, las herramientas y posicionamiento de soldaduras, la automatización, el monitoreo y control de procesos, los métodos para la evaluación y las prueba de soldaduras, la calidad de soldaduras, la inspección de soldaduras y examen no destructivo, y la economía de soldadura (AWS, 2015, p.2).

2.3. Soldadura en estado sólido

La soldadura en estado sólido es un proceso que genera juntas soldadas con la aplicación de presión y temperatura principalmente y en ocasiones en que la presión y la temperatura son diferente al ambiente, el tiempo también cumple un rol importante para lograr la cohesión necesaria. Su principal característica es que tiene la capacidad de unir metales disimiles que no pueden ser soldados exitosamente con procesos que involucren la fundición de materiales (AWS, 2015, p.52). En la tabla 1-2 se presentan los seis procesos de soldadura en estado sólido ordenados desde el proceso donde se genera una mayor temperatura hasta el proceso con la más baja temperatura.

Tabla 1-2: Procesos de soldadura en estado sólido.

NOMBRE	DESIGNACIÓN		CARACTERÍSTICA
Soldadura por forja	*Forge welding*	FOW	Temperaturas de trabajo del 80% – 90 % de la temperatura de fusión del material.
Soldadura por fricción	*Friction welding*	FRW	Temperaturas de trabajo próximas a la fusión.
Soldadura por difusión	*Difucion welding*	DFW	Las temperaturas se encuentras alrededor del 50% - 70% del punto de fusión.
Soldadura ultrasónica	*Ultrasonic welding*	USW	Frecuencias empleadas que van de 15kHz a 75kHz.
Soldadura por explosión	*Explosión welding*	EXW	Es necesario la utilización de explosivos.
Soldadura en frío	*Cold welding*	CW	Es un proceso de soldadura a temperatura ambiente.

Fuente: (López, 2013, p.13-16).

Realizado por: Huaraca A, 2021.

2.4. Soldadura por fricción

La soldadura por fricción aprovecha el calor que generan dos superficies al estar en fricción mecánica constante. El principio de este método de soldadura es que una superficie que se encuentra en rotación, se pone en contacto con otra rozándola y creando calor suficiente para ablanda el material, en ese momento se ejerce una fuerza de empuje que produce la soldadura, tal como se muestra en la figura 1-2.

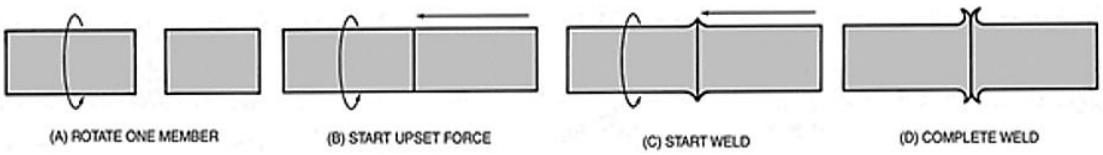


Figura 1-2: Proceso de soldadura por fricción.

Fuente: (AWS, 2015, p.185)

Se utiliza para unir piezas, aun cuando sean de naturalezas distintas, lo cual les confiere innumerables ventajas respecto a los otros tipos de soladura. Se debe tener en cuenta que para utilizar este método de soldadura al menos una de las piezas tendrá que ser un sólido de revolución además que no se necesita material de aporte, fundentes ni gases protectores (Sanguña y Yépez, 2012, p.191).

2.4.1. Tipos

Existe una gran variedad de procesos especiales de soldadura, experimentales, y/o variaciones de procesos existentes y otros son la evolución de procesos anteriores. Sin embargo, algunos han logrado una relevancia por su utilidad y versatilidad en la industria. En la tabla 2-2 se muestran los tres principales tipos de soldadura por fricción que se están desarrollando en la actualidad.

Tabla 2-2: Tipos de soldadura por fricción.

NOMBRE	DESIGNACIÓN	
Soldadura por fricción lineal.	*Friction lineal welding*	*FLW*
Soldadura por fricción – agitación.	*Friction stir welding*	*FSW*
Soldadura por fricción rotacional.	*Friction rotary welding*	*FRW*

Fuente: (López, 2013, p.17-21).

Realizado por: Huaraca A, 2021.

En la figura 2-2 se muestra el proceso de soldadura por fricción lineal, mientras que en la figura 3-2 se muestra el proceso de soldadura por fricción – agitación o FSW *Friction Stir Welding.*

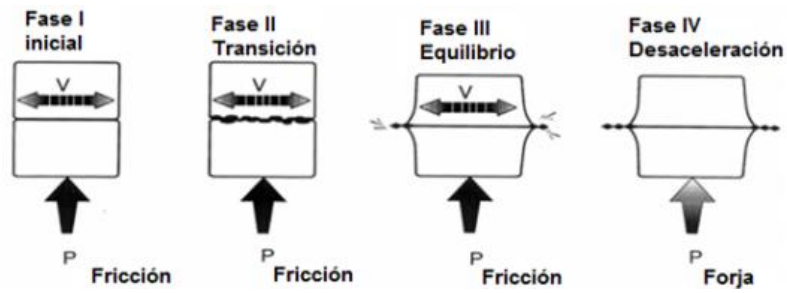


Figura 2-2: Fases del proceso de soldadura por fricción lineal.

Fuente: (López, 2013, p.21).

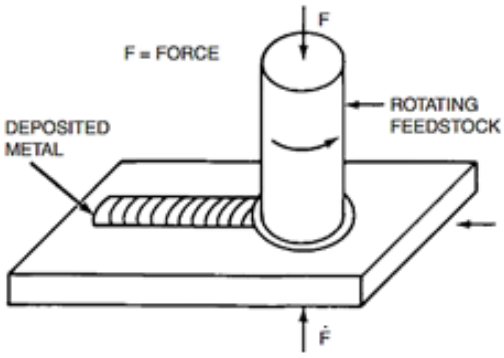


Figura 3-2: Soldadura por fricción – agitación.

Fuente: (AWS, 2015, p.190)

2.5. Soldadura por fricción rotacional

El principio que aplica la soldadura por fricción rotacional es que una pieza de revolución que se encuentra en rotación fija o variable alrededor de su eje longitudinal, se une con otra pieza rozándola y creando calor suficiente para llevar a las piezas a temperaturas cercanas a las temperaturas de fusión, pero cuyo objetivo es únicamente ablanda el material; al llegar a la temperatura donde el material se plastifica, el movimiento se detiene abruptamente y es entonces donde se ejerce una fuerza de empuje, la misma que produce la soldadura y una interpenetración granular, tal como se muestra en la figura 4-2. Al finalizar la soldadura se presenta un exceso de material en la periferia de los elementos que se eliminará posteriormente con una herramienta de corte (Angamarca y García, 2018, p.15).

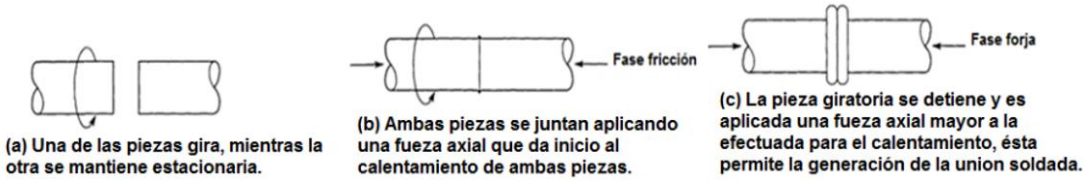


Figura 4-2: Soldadura por fricción rotacional.

Fuente: (López, 2013, p.23).

La soldadura por fricción rotacional se considera relativamente sencilla respecto a los otros tipos, ya que no utiliza fuentes de calor externa ni herramientas, aunque al trabajar con ejes y tubería debe existir una cuidadosa alineación. La velocidad de rotación, la presión axial y el tiempo de soldadura son las principales variables que deberán ser controladas con el fin de proporcionar la correcta combinación de calor y presión para formar la soldadura (AWS, 2015, p.184).

2.5.1. Fases del proceso

2.5.1.1. Etapa 1. Contacto inicial

Los elementos se ponen en contacto provocando un torque friccional alto, una leve desaceleración en la velocidad rotacional y una consecuente disipación de energía almacenada ya que las superficies se someten a una fricción directa y agresiva. Este primer contacto prepara a las superficies eliminando asperezas e irregularidades hasta obtener un contacto homogéneo (Villareal, 2019, p.34 ; AWS, 2015, p.185).

2.5.1.2. Etapa 2. Fricción

La fricción es la interfaz donde los elementos generan una deformación termomecánica en la que material se encuentra plastificado (viscoplástico). A esta condición se la conoce como etapa de transición ya que el calentamiento por fricción supera al endurecimiento por deformación, teniendo como resultado un par torsor constante. Mientras la fricción permanece continua, la temperatura aumenta y el par torsor llega a un máximo, además la zona de plastificación se ensanchará y la aparición de rebabas en la periferia será cada vez mayor (Villareal, 2019, p.34 ; AWS, 2015, p.185).

2.5.1.3. Etapa 3. Forja

Es la etapa final del proceso, donde se aplica una fuerza de forja diferente y mayor que la fuerza de fricción provocando un acortamiento axial de la pieza. El par de torsión disminuye y la velocidad rotacional llega hasta cero. Es posible que en una zona muy reducida de la junta se genere un compuesto con cierto grado de aleación como resultado de la mezcla y la difusión mecánica. Es una fase que debe tener especial cuidado al tratarse con materiales disimiles ya que intervienen muchos más factores además de las propiedades físicas como la energía de superficie, la estructura cristalina, el grado de soldabilidad, los compuestos intermetálicos, entre otros, haciendo más difícil la predicción la calidad final de la junta (Villareal, 2019, p.35). En la figura 5-2 se muestran las etapas del proceso de soldadura por fricción y se evidencia la reducción axial y generación de rebabas del material.

Figura 5-2: Etapas de la soldadura FR.

Fuente: (Villareal, 2019, p.35).

La fase de forjado se caracteriza por aplicar una mayor presión entre las piezas a soldar, la carga debe ser aplicada en algún punto de la etapa de parada y puede ser: (AWS, 2015, p.186)

- Cuando el mandril está desacelerando lo que originará una fuerza de torsión adicional que se aplicará a la soldadura.
- Al final de la etapa de parada donde la forja es afectada únicamente por la fuerza axial aplicada en el proceso.

2.5.2. Factores de influencia

Cinco factores cualitativos influyen en la calidad de una soldadura de fricción y deberán controlarse para mejorar la calidad de soldadura: (López, 2013, p.22)

- Velocidad de rotación (rpm).
- Presión aplicada, tanto en el calentamiento como en la forja.
- Temperatura de las superficies.
- Propiedades del material.
- Estado de las superficies de contacto (contaminación).

Los primeros tres factores dependen del proceso mientras que los últimos dos están relacionados exclusivamente con el material a unir. Aunque la temperatura de la superficie no se mide o controla directamente, los efectos de una temperatura insuficiente o excesiva son generalmente evidentes a simple vista al examinar la soldadura terminada (López, 2013, p.23).

2.5.3. Zona de afectación térmica

En las uniones soldadas a tope por fricción rotacional se producen principalmente 3 fases observables. Se presenta una zona central correspondiente al material plastificado (ZM), a continuación, se presenta la zona de afectación térmica y mecánica del material (ZTMA) y por

último se muestra la zona de afectación térmica (ZTA), distribuidas como se muestra en la figura 6-2 (Guzmán, 2017, p.16).

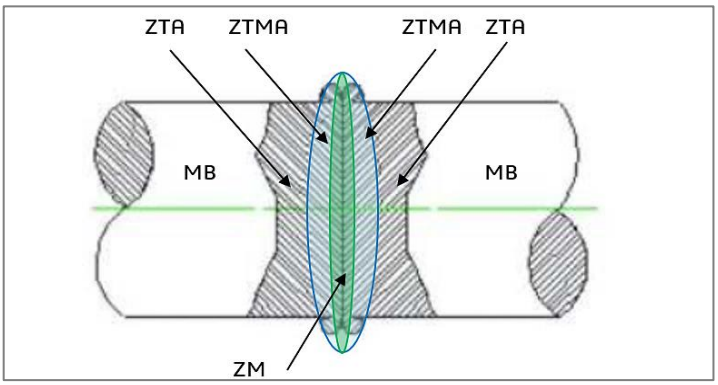


Figura 6-2: Zonas térmicas de la soldadura por fricción rotacional.

Realizado por: Huaraca A, 2021.

Cada una de las zonas presenta características específicas que las distinguen entre sí, las mismas que se encuentran resumidas a continuación en la tabla 3-2.

Tabla 3-2: Zonas que se presentan en el proceso de soldadura.

ZONAS		CARACTERÍSTICAS
Zona mezclada	ZM	Corresponde a la zona de recristalización generada por la deformación plástica y el calentamiento en la soldadura FRW dando lugar a la aparición de granos finos.
Zona afectada térmica y mecánicamente	ZTMA	Es exclusiva de los procesos FRW y es la zona que experimenta deformación plástica y temperaturas moderadas donde la recristalización completa no es posible.
Zona afectada por el calor	ZTA	Esta zona no presenta deformación plástica pero debido a la generación de calor experimenta cambios microestructurales y de sus propiedades.
Material base	MB	Representa al material que no ha sido afectado ni micro estructuralmente ni en sus propiedades.

Fuente: (Rea y Vásconez, 2020, p.16)

Realizado por: Huaraca A, 2021.

2.5.4. Uniones

Es necesario al menos que una de las dos superficies de trabajo sea un volumen de revolución y deberá estar balanceada ya que girará a una velocidad relativamente alta y podría dañar el equipo. Las combinaciones posibles entre ejes, tubos y platinas para la soldadura por fricción se muestran a continuación en la figura 7-2. Se recomienda además que el material con menor resistencia al forjado o menor conductividad térmica debe tener un área de sección transversal mayor (Raj, 2016, p.7).

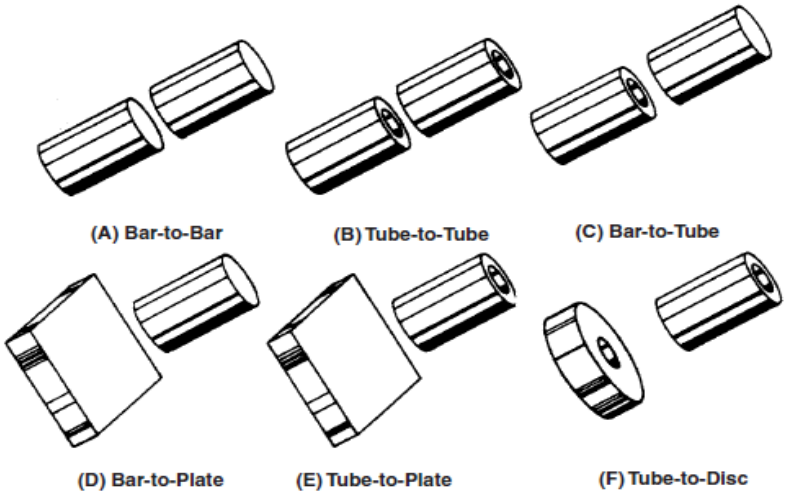


Figura 7-2: Uniones típicas para juntas de soldadura por fricción.

Fuente:(AWS, 2015, p.197).

2.5.5. Soldabilidad

La soldabilidad depende de algunos factores como los componentes específicos de la aleación, el diseño del componente o el servicio que brinda. Algunos metales en cambio, necesitan un tratamiento térmico posterior. La información de la carta presentada por la AWS de la figura 8-2 deberá ser usada solo como una guía.

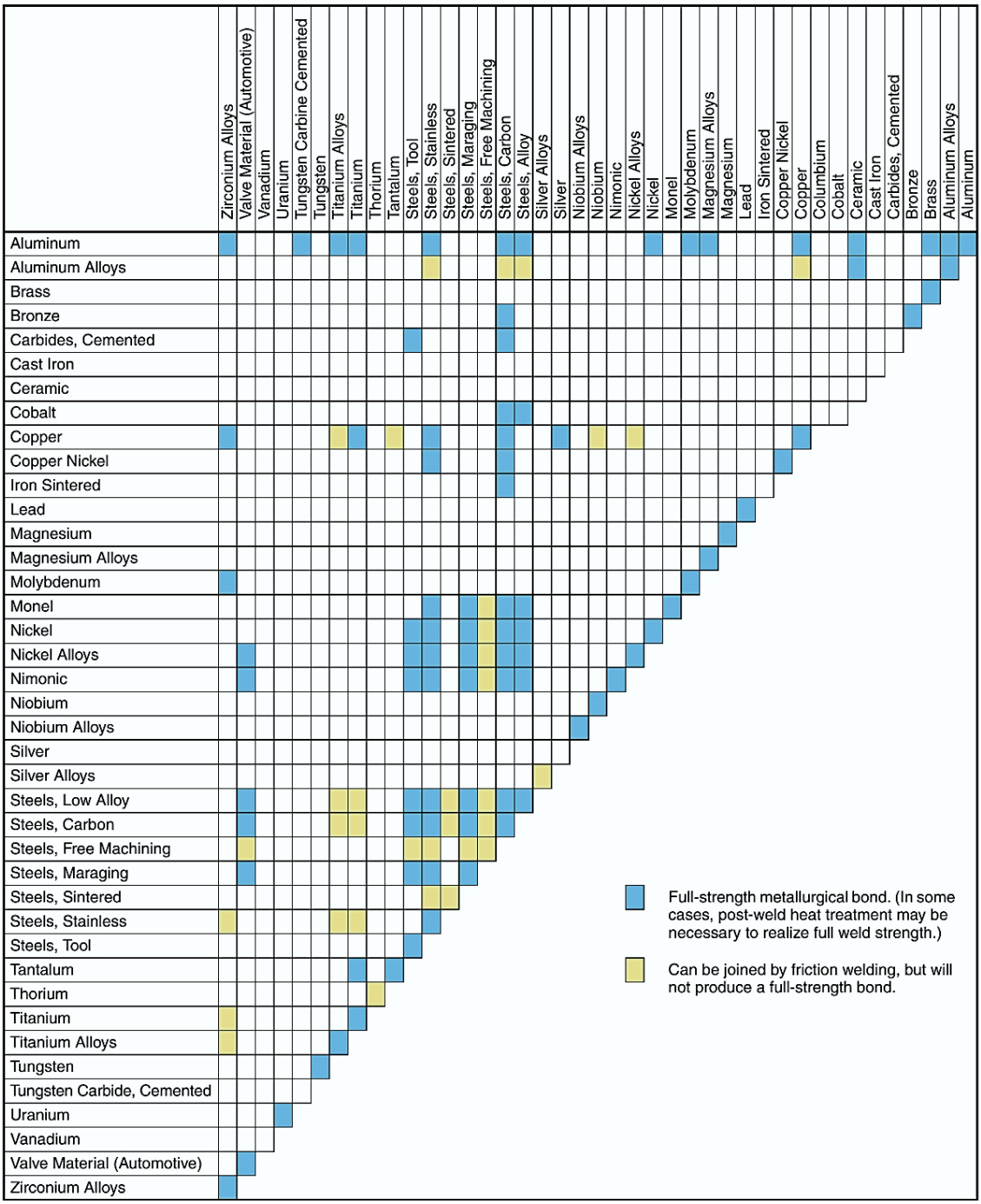


Figura 8-2: Soldabilidad de materiales.

Fuente:(AWS, 2015, p.196)

2.5.6. Aplicación

En la actualidad, se pueden encontrar componente que ha sido soldados por fricción en la mayoría de sectores industriales y de producción como la industria agrícola, automotriz, petrolera, aeroespacial e incluso en la marina y sectores de defensa. En la tabla 4-2 se muestran ejemplos puntuales de la aplicación de esta tecnología.

Tabla 4-2: Áreas de aplicación de la soldadura por fricción.

ÁREA DE INGENIERÍA	MECANISMOS
Área aeroespacial	Estructuras en el fuselaje, Blisks (discos utilizados en turbinas)
Área de la construcción	Cilindros y varillas hidráulicas, piezas giratorias y rodillos de mando.
Área automotriz	Ejes de dirección, engranajes de transmisión, válvulas de cilindros, componentes de la línea de transmisión, varillas de suspensión y amortiguadores
Área petrolífera	Barras de perforación para pozos (drill rods), tubos API (drill pipes)
Área eléctrica	Componentes bimetálicos de aluminio-cobre
Área equipo agrícola	Vástagos de pistones hidráulicos, rodillos guía, engranes, bujes, ejes y componentes similares.

Fuente: (Paucar y Suquillo, 2018 p.7; López, 2013, p.38-42)

Realizado por: Huaraca A, 2021

2.5.7. Ventajas del proceso

Entre las principales ventajas que la soldadura por fricción presenta, podemos encontrar las siguientes: (López, 2013, p.43; AWS, 2015, p.185)

- Una amplia gama de materiales puede ser soldada por este método.
- No necesita material de aporte ni fundente
- La zona de afectación por calor es pequeña.
- El material base permanece con sus propiedades mecánicas y tecnológicas intactas.
- La resistencia de una unión es igual o mayor que la resistencia del material base.
- La limpieza de la superficie no es tan critica a diferencia de otros procesos de soldadura.
- Es un proceso ambientalmente limpio, no produce humos, gases, vapores residuales o calor excesivo hacia el medio circundante.
- No se requiere habilidades de soldadura y los tiempos de trabajo son cortos.

2.5.8. Limitaciones del proceso

Entre las limitaciones con mayor importancia que presenta la soldadura por fricción, podemos encontrar las siguientes: (López, 2013, p.43; AWS, 2015, p.186)

- El costo inicial de inversión en el equipo es alto.
- Los tipos de juntas que se pueden adaptar a este proceso son limitados. Generalmente se trabaja con juntas a tope.

- La geometría de los materiales a unir es limitada y presenta influencia directa del equipo con el que se cuenta para trabajar.
- Al menos una pieza debe tener un eje de simetría y ser capaz de rotar alrededor de su eje. Los ejes de simetría deberán ser exactamente alineados.

2.6. Métodos de entrada de energía

2.6.1. Soldadura por fricción inercial (Inertial – drive friction rotatory welding.

Se utiliza un tipo de máquina similar a un torno donde el husillo que sostiene la pieza giratoria está unida a un volante que controla la entrada de energía a la soldadura. La presión axial se aplica y se mantiene constante mientras los materiales están en fricción, la energía cinética almacenada en el volante se disipa y reduce la velocidad del volante entonces cuando el cabezal se ha detenido o está cerca de llegar a una parada completa, se aplica una presión mayor llamada presión de forja. Para cada combinación de materiales, existe una velocidad mínima de trabajo, por debajo de ésta los resultados de la soldadura no serán satisfactorios (Villareal, 2019, p.32). En la figura 9-2 se muestra el comportamiento de la velocidad de fricción, la fuerza de fricción y la distancia longitudinal que cede el material en la etapa de plastificación respecto al tiempo de ensayo.

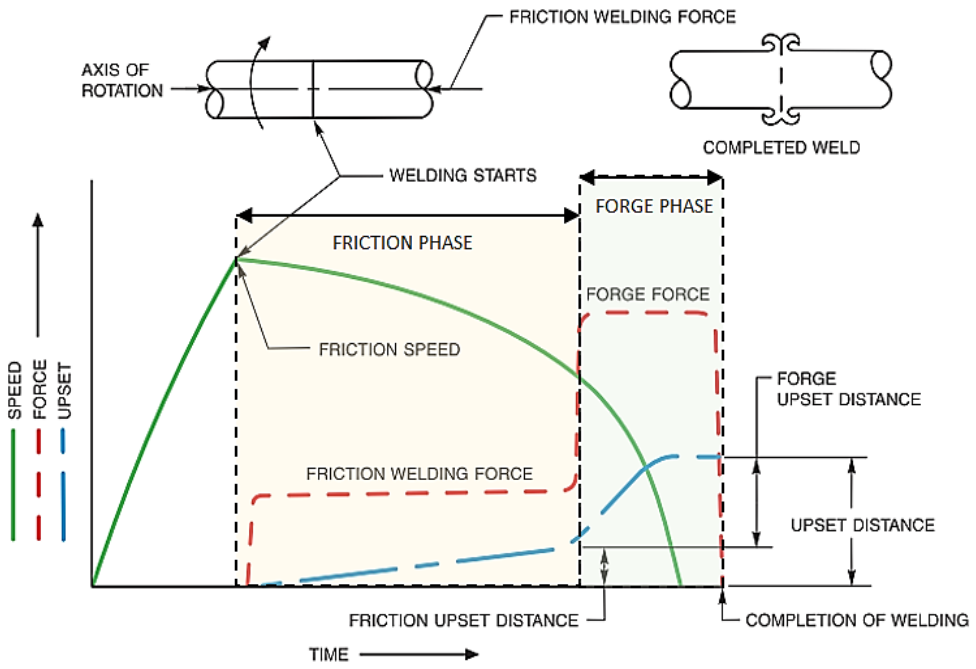


Figura 9-2: Características y parámetros de la soldadura por inercia.

Fuente: (AWS, 2015, p.187)

Las variables que controlan las características de la soldadura por inercia son tres: la velocidad periférica a la cual gira la pieza de trabajo, la presión axial y el tamaño del volante.

2.6.1.1. Velocidad periférica

A velocidades inferiores a 1,5 m/s, el patrón de la soldadura tiene forma de reloj de arena y borrosa en el centro mientras que con velocidades más altas que 1,5 m/s la soldadura se vuelve plana y de grosor uniforme. La velocidad sugerida para una soldadura satisfactoria es 1,5 m/s o mayores si se trabaja con aceros de bajo carbono y mayores a 1,8 m/s en aceros para herramientas (López, 2013, p.31; AWS, 2015, p.188).

2.6.1.2. Presión axial

El uso de altas presiones axiales estrecha la zona afectada por el calor y reduce el tiempo de soldadura (López, 2013, p.32; AWS, 2015, p.188).

2.6.1.3. Tamaño del volante

La capacidad de potencia del volante está limitada sólo por la velocidad a la que puede ser retardado. Además, el volante suministra la fuerza de torsión de forja hacia el final del ciclo de soldadura (López, 2013, p.32; AWS, 2015, p.188).

2.6.2. Soldadura por fricción directa (Direct – drive friction rotatory welding)

En la soldadura por fricción por accionamiento directo una de las piezas está acoplada en el mandril, accionado a su vez por un motor que está girando a una velocidad constante mientras que la otra pieza se encuentra estática. Se aplica una fuerza de fricción hasta generar la cantidad de calor adecuado para plastificar el material, se detiene al motor y se aplica la fuerza de forja por un tiempo hasta que cesa la rotación totalmente (Villareal, 2019, p.31). En la figura 10-2 se muestra la relación entre la velocidad de fricción, la fuerza de fricción y la distancia longitudinal que cede el material en la etapa de plastificación, respecto al tiempo de ensayo.

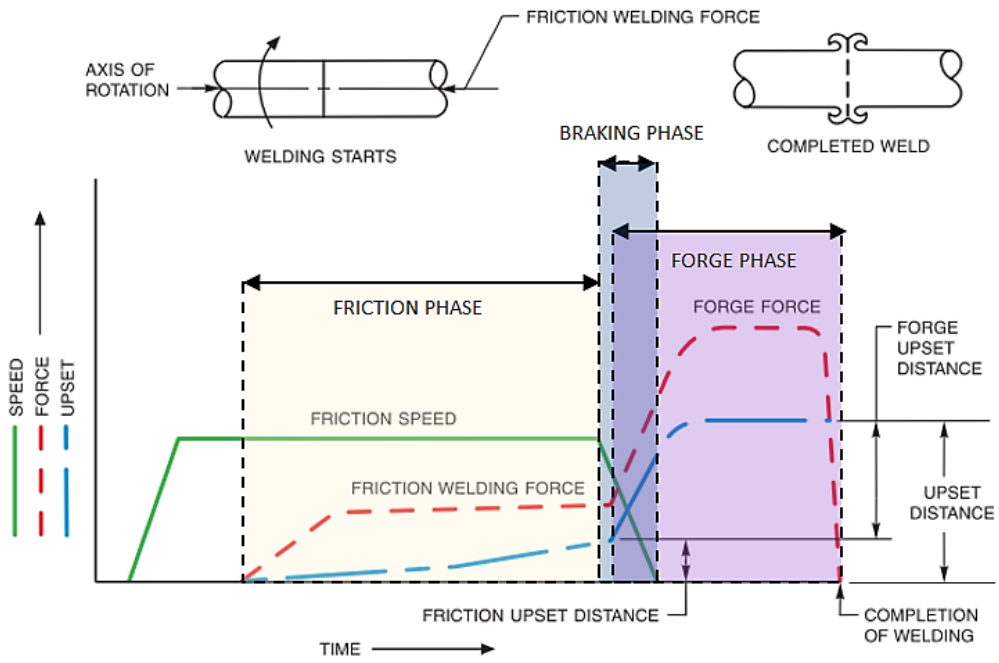


Figura 10-2: Características y parámetros de la soldadura por fricción directa.

Fuente:(AWS, 2015, p.188)

Las soldaduras confiables se producen una vez que los parámetros de trabajo se han controlado y determinado su valor adecuado. Las principales variables en este proceso son la velocidad rotacional, la presión de calentamiento, la presión de forja, la temperatura y la duración del calentamiento, además, se deben considerar factores secundarios como la tasa de acumulación de presión durante el calentamiento y forja, la desaceleración durante el frenado y las propiedades de los materiales a soldar (López, 2013, p.26).

2.6.2.1. Velocidad rotacional

Respecto a experiencias se ha establecido que una soldadura de calidad se puede realizar con velocidades periféricas desde 75m/min a 105m/min. Las velocidades bajas desarrollan altos pares mientras que velocidades más altas producen una amplia zona afectada por el calor. Si la velocidad de rotación es constante y dentro del rango, la temperatura del proceso será constante haciendo imposible la formación de compuestos inter-metálicos (López, 2013, p.26; AWS, 2015, p.191).

2.6.2.2. Presión

La presión influye directamente en el control de la temperatura en la zona de soldadura y el acortamiento axial.

La presión de calentamiento que se genere debe ser lo suficientemente alta para evitar que las superficies en contacto se oxiden además que debe ser suficiente para mantener a las superficies en contacto (Villareal, 2019, p.31). La presión de forja, en cambio debe ser suficiente para consolidar la unión. La presión influye en el gradiente de temperatura, el par motor y la potencia (López, 2013, p.26) . Una baja presión aumenta la zona afectada por el calor y una alta presión haría extrudir los materiales plásticos de forma prematura, forzando al material frío a entrar en contacto, generando defectos críticos en la unión, como se muestra en el gráfico 1-2 y gráfico 2-2 respectivamente (AWS, 2015, p.191).

2.6.2.3. Tiempo de calentamiento

La duración del calentamiento determina la entrada de energía en la unión y se rige por la deformación plástica de los materiales. El tiempo de calentamiento se reduce a medida que aumenta la presión de fricción y proporcionalmente con la velocidad de rotación en la misma presión (López, 2013, p.27; AWS, 2015, p.192).

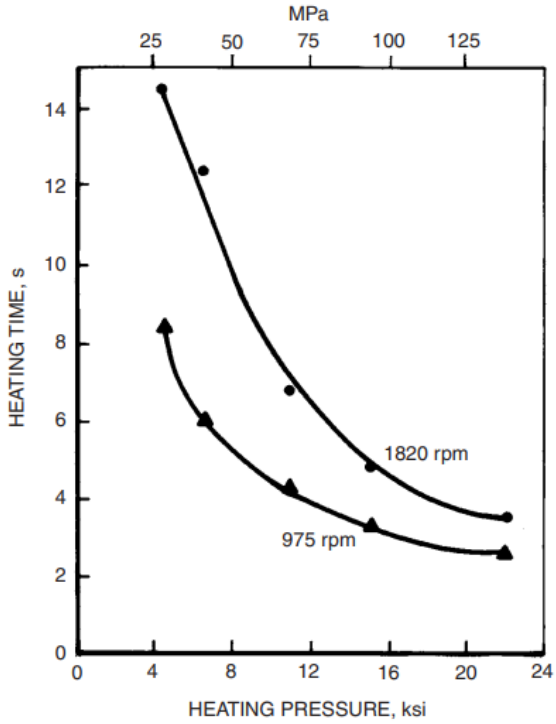


Gráfico 1-2: Relación entre el tiempo de calentamiento y la presión de fricción.

Fuente: (AWS, 2015, p.192)

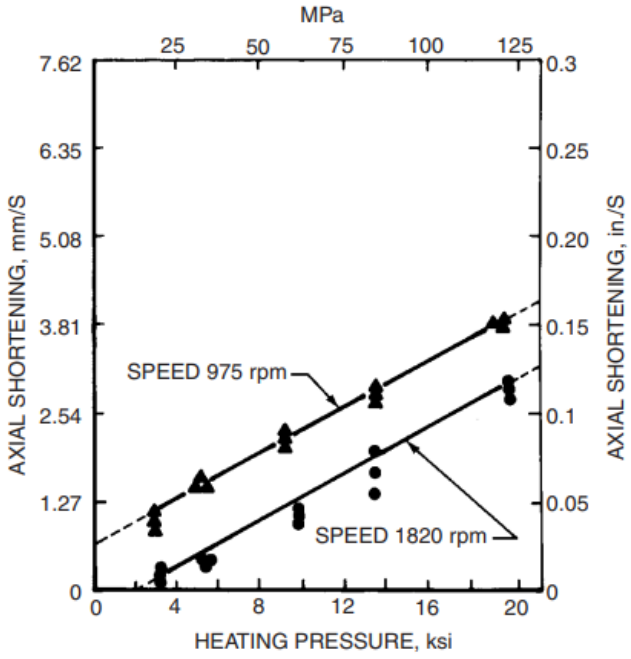


Gráfico 2-2: Relación entre la deformación axial y la presión de fricción.

Fuente: (AWS, 2015, p.192)

2.7. Selección de parámetros

Una serie de materiales y sus combinaciones, tales como aceros al carbono de bajo, medio y alto nivel de carbono, aceros aleados, aceros rápidos, aceros inoxidables, cobre, aluminio y sus aleaciones respectivas están siendo ampliamente soldadas con este método. La tabla 5-2 y tabla 6-2 indican los parámetros recomendados para realizar la soldadura de un diámetro de eje determinado entre los mismos materiales y materiales distintos (López, 2013, p.27).

Tabla 5-2: Uniones entre el mismo material para ejes de 25mm.

MATERIALES	VELOCIDAD RPM	FUERZA AXIAL KN	MATERIAL PERDIDO mm	TIEMPO seg
Acero SAE 1018	4600	53	2,5	2
Acero SAE 1045	4600	62	2,5	2
Acero SAE 4140	4600	67	2,5	2
Inconel 718	1500	220	3,8	3
Acero inoxidable Martencítico	3000	90	2,5	2,5
Acero inoxidable 410	3000	80	2,5	2,5
Acero inoxidable 302	3500	80	2,5	2,5
Cobre comercial	8000	22	3,8	0,5
Aleación de cobre 260	7000	22	3,8	0,7
Aleación de titanio TIGAL-4V	6000	36	2,5	2
Aleación de aluminio 1100	5700	27	3,8	1

Fuente: (López, 2013, p.28)
Realizado por: Huaraca A, 2021.

Tabla 6-2: Unión entre materiales distintos para eje de 25mm.

MATERIALES	VELOCIDAD RPM	FUERZA AXIAL KN	MATERIAL PERDIDO mm	TIEMPO seg
Acero SAE 1018 con Cobre	800	22	3,8	1
Acero rápido M2 con Acero SAE 1045	3000	180	2,5	3
Aleación Níquel 718 con Acero SAE 1045	1500	180	3,8	2,5
Acero alto en Carbono con Acero SAE 1018	4600	53	2,5	2,5
Acero inoxidable 302 con Acero SAE 1020	3000	80	2,5	2,5
Aluminio SAE 6061 con Acero inoxidable 302	5500	22	5,1	3
Cobre con Aleación de aluminio 1100	2000	33	5,1	1

Fuente: López, 2013, p.29)

Realizado por: Huaraca A, 2021.

2.8. Acero ASTM A-36

Considerado como uno de los materiales más empleados para aplicaciones estructurales y muy popular dentro de la industria ecuatoriana por la disponibilidad en el mercado y variedad en su presentación (perfiles, placas y ejes) es ideal para la construcción de herramientas, maquinaria, edificaciones, puentes, en general con un propósito puramente estructural. Posee una resistencia mínima a la fluencia de 36 Ksi (248MPa) con un comportamiento lineal y elástico hasta la fluencia, evitando un fallo inminente además que posee alta soldabilidad por su bajo contenido de carbono y materiales aleantes, alrededor del 0,29% de carbono y 1% de molibdeno en ejes (Mott, 2009, p.75).

2.8.1. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas son aquellas que tienen relación con el comportamiento que un material tiene al aplicársele una carga y están estrechamente relacionadas con la composición química y la estructura cristalina. En la tabla 7-2 se muestran las principales propiedades mecánicas que el acero ASTM A36 presenta.

Tabla 7-2: Propiedades mecánicas acero ASTM A36.

PROPIEDADES	VALOR	UNIDADES
Densidad	7850	kg/m^3
Límite de fluencia	32-36 (250-280)	Ksi(MPa)
Resistencia a la tensión	58-80 (400-550)	Ksi(MPa)
Módulo de elasticidad	29000	Ksi
% de elongación mínimo	20 (8’’)	%
Punto de fusión	1538	°C

Fuente: (Mangono, 2001, p.466)

Realizado por: Huaraca A, 2021

2.8.2. Propiedades químicas

La estructura cristalina de los aceros juega un factor fundamental al definir el comportamiento del material. Las estructuras principales que se pueden encontrar en los aceros al carbono son ferrita, cementita, perlita, martensita y austenita así por ejemplo una mayor concentración de carbono se debe a la presencia de perlita y, por otro lado, si aumentamos la temperatura del material la ferrita y perlita se trasforman en austenita (Mangono, 2001, p.465). A continuación, en la tabla 8-2 se muestran los valores que un acero ASTM A36 debe presentar en su composición química.

Tabla 8-2: Requerimientos químicos del acero ASTM A-36

Product	Shapes[A]	Plates > 15-in. [380 mm] Width[B]					Bars; Plates ≤ 15-in. [380 mm] Width[B]			
Thickness, in. [mm]	All	To ¾ [20], incl	Over ¾ to 1½ [20 to 40], incl	Over 1½ to 2½ [40 to 65], incl	Over 2½ to 4 [65 to 100], incl	Over 4 [100]	To ¾ [20], incl	Over ¾ to 1½ [20 to 40], incl	Over 1½ to 4 [100], incl	Over 4 [100]
Carbon, max, %	0.26	0.25	0.25	0.26	0.27	0.29	0.26	0.27	0.28	0.29
Manganese, %	...	...	0.80–1.20	0.80–1.20	0.85–1.20	0.85–1.20	...	0.60–0.90	0.60–0.90	0.60–0.90
Phosphorus, max, %	0.04	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.04	0.04	0.04	0.04
Sulfur, max, %	0.05	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.05	0.05	0.05	0.05
Silicon, %	0.40 max	0.40 max	0.40 max	0.15–0.40	0.15–0.40	0.15–0.40	0.40 max	0.40 max	0.40 max	0.40 max
Copper, min, % when copper steel is specified	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

[A] Manganese content of 0.85–1.35 % and silicon content of 0.15–0.40 % is required for shapes with flange thickness over 3 in. [75 mm].
[B] For each reduction of 0.01 percentage point below the specified carbon maximum, an increase of 0.06 percentage point manganese above the specified maximum will be permitted, up to the maximum of 1.35 %.

Fuente: (ASTM A36/A36M-05, 2019, p.3)

2.9. Ensayos no destructivos

2.9.1. Inspección visual

Los ensayos de inspección visual son un conjunto de operaciones que se llevan a cabo durante todo el desarrollo de un proceso con el fin de asegurar la calidad final de la junta soldada, reduciendo así la utilización de ensayos destructivos posteriores. Para facilitar el proceso de inspección visual es necesario contar con instrumentos como calibres, galgas, equipos de medición de temperaturas o presiones, entre otros. Al finalizar, los requisitos que una junta soldada deberá reunir son los siguientes: (Federación de enseñanza de CC.OO. de Andalucía, 2011a, p.3-4)

- La soldadura se presentará libre de grietas.
- El material base y la cara de la soldadura deberán estar al mismo nivel. El espesor total de la soldadura sea igual o mayor al del metal base.
- Evitar refuerzos de soldadura superiores a 3mm.

No debe haber evidencia de grietas, fusión incompleta, o penetración inadecuada en la raíz de la soldadura.

2.10. Ensayos destructivos

2.10.1. Dureza

Los ensayos de dureza determinan la resistencia a la penetración que presentan los materiales. Usualmente son utilizados como un método rápido de aproximación al esfuerzo último a la tracción de un área testeada (Federación de enseñanza de CC.OO. de Andalucía, 2011b, p.5-14). La medida de dureza provee información sobre los cambios metalúrgicos causados por la soldadura. Su principal objetivo es cuantificar el cambio a nivel microestructural que un material sufre en la zona de afectación térmica con respecto a las zonas no afectadas después de un proceso de soldadura. De existir un cambio considerable, se podría optar por aplicar un tratamiento térmico posterior para ablandar o endurecer el material según lo requerido. Los ensayos son realizados usando un identador que es forzado sobre la superficie del elemento testeado para formar una huella o identación. El tipo de material, la geometría y el tamaño del identador (cono, pirámide o esfera) dependen del método de testeo y el rango de dureza, pero por lo general, los identadores pueden estar hechos de acero templado, carburo de tungsteno o diamante (Toapanta, 2015, p.41-42).

2.10.2. Métodos de obtención de la dureza.

Los métodos de dureza para metales incluyen los métodos de Brinell, Knoop, Vickers y Rockwell donde los tres primeros utilizan el área de identación bajo una carga para determinar la dureza, en cambio el ensayo de dureza Rockwell usa la profundidad de identación bajo una carga como medida de dureza. Se puede agrupar también a los ensayos según el tamaño de su identación donde el ensayo Brinell y Rockwell presentan una identación macroscópica y en los otros dos métodos se muestra una identación microscópica (Smith y Hashemi, 2014, p.228).

2.10.2.1. Ensayo Brinell

El ensayo de dureza Brinell consiste en impregnar el identador esférico de acero extra duro en la cara del material con una carga y durante un tiempo determinado. Se toma la medida del diámetro de la huella y se convierte en un valor de dureza según *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Metals*, ASTM E10 (ASTM E10-18, 2018, p.1).

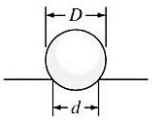
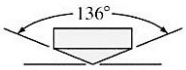
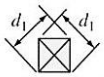
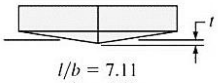
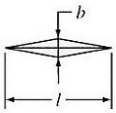
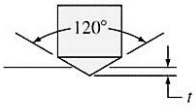
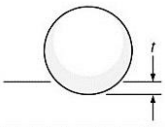
2.10.2.2. Dureza Rockwell

Se establece por la medida de la profundidad de la huella y es un valor que se obtiene directamente de acuerdo con lo establecido en *Standard Test Method for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Metals, ASTM E18* (ASTM E18-16, 2016, p.1).

2.10.2.3. Ensayo Vickers y Knoop

Tienen el mismo principio del ensayo Brinell y su valor se obtiene dividiendo la carga usada en kgf para el área resultante de la identación en mm^2. El identador en el método Knoop es una pirámide de base romboide de ángulos 172° y 130°, mientras que el identador para a la dureza Vickers es una pirámide de base cuadrada de ángulo 136° de acuerdo ASTM E384 (ASTM E384-17, 2005, p1-2). En la tabla 9-2 se muestra en resumen los diferentes tipos de ensayos para obtener la dureza de un material.

Tabla 9-2: Resumen de ensayos de dureza.

Ensayo	Penetrador	Forma del penetrador: Vista lateral	Forma del penetrador: Vista en planta	Carga	Fórmula del número de dureza
Brinell	Esfera de 10 mm fabricada de acero o carburo de volframio			P	$\mathrm{BHN} = \dfrac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pirámide de diamante			P	$\mathrm{VHN} = \dfrac{1.72P}{d_1^2}$
Microdureza Knoop	Pirámide de diamante	 $l/b = 7.11$ $b/t = 4.00$		P	$\mathrm{KHN} = \dfrac{14.2P}{l^2}$
Rockwell A, C, D	Cono de diamante			60 kg $R_A =$ 150 kg $R_C =$ 100 kg $R_D =$	100–500f
B, F, G	Esfera de acero de $\frac{1}{16}$ pulgadas			100 kg $R_B =$ 60 kg $R_F =$ 150 kg $R_G =$ 100 kg $R_E =$	130–500f
E	Esfera de acero de $\frac{1}{8}$ pulgadas				

Fuente: (Smith y Hashemi, 2014, p.229)

2.11. Caracterización metalográfica

Según la Federación de enseñanza de CC.OO. de Andalucía, al hablar de caracterización se hace referencia a "la evaluación de las características químicas, estructurales, mecánicas y tecnológicas de los materiales, propiedades físicas (elásticas, eléctricas y electromagnéticas), transferencias de calor y trazado de isotermas". La metalografía es un análisis esencial para el estudio de las características y constitución de un metal ya que relaciona las propiedades físicas y mecánicas. El estándar más común utilizado para el análisis metalográfico es el ASTM E-3 (Chávez, 2017, p.27).

2.11.1. Extracción

En ocasiones es necesario cortar una parte del material ensayado para proporcional una fácil manipulación. Para obtener una sección de superficie plana se recomienda un corte por disco abrasivo y para controlar la temperatura generada por fricción en el corte se utilizará un lubrirefrigerante, caso contrario si no se controla este factor la estructura original podría verse modificada. Este es el método normalizado planteado en la norma ASTM E-3. Si se requiere mejorar aún más la manipulación de la muestra o conservar alguna capa presente en los bordes, es necesario que el material se monte un material extra. El material extra se puede añadir en frío, cuando la muestra se coloca en un molde y luego se agregan las partes de resina necesarias, o bien en caliente, donde la muestra es colocada en una prensa y luego se agrega baquelita a una presión y temperatura determinadas para enfriarla posteriormente. La apariencia final de las probetas se asemejará a las presentadas en la figura 12-2 (Chávez, 2017, p.27).

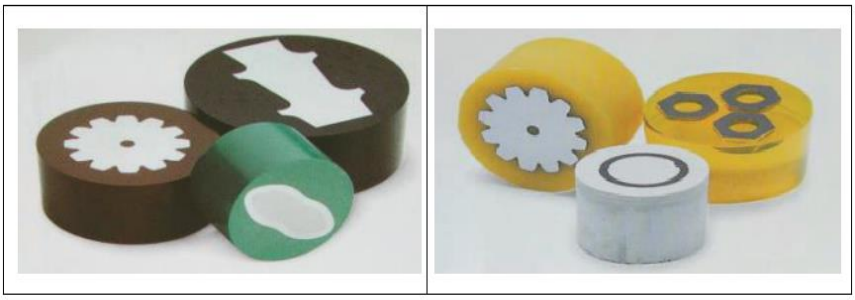


Figura 11-2: Muestras en baquelita (izquierda), muestras en resina (derecha).

Fuente: (Chávez, 2017, p.27).

2.11.2. Desbaste y pulido

El desbaste se utiliza para eliminar de manera superficial residuos de procesos anteriores. Se inicia con un desbaste secuencial grueso mediante discos y papeles abrasivos al agua de denominación

80 hasta 240 granos/pulgada lineal eliminando rebabas y rayaduras generadas por el corte. En la etapa de desbaste fino se utilizan papeles abrasivos desde la numeración 240 hasta 600 granos/pulgada lineal con pequeñas cantidades de agua en circulación para evitar rayones en la superficie. Finalmente, en la etapa de pulido se emplea un paño y como abrasivo, alúmina de 1 micrón semidiluida en agua y consecuentemente alúmina de 0,3 micrón en las mismas condiciones. Para los procesos de desbaste es importante recordar que con cada abrasivo se deberá girar la probeta 90° respecto a la fase anterior, para eliminar por completo las deformaciones de la superficie. En la figura 13-2 se muestra esquemáticamente la eliminación secuencial de las deformaciones superficiales (Llulluna, 2014, p.27).

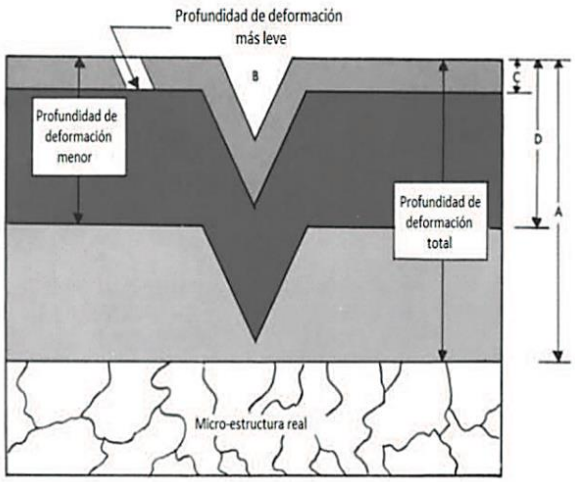


Figura 12-2: Esquematización de desbaste.

Fuente: (Llulluna, 2014, p.27)

2.11.3. Ataque químico

El ataque químico hace referencia a un proceso controlado de corrosión aplicado en la superficie de la muestra, que actúa sobre la ferrita y perlita que el material presenta. Al realizar el ataque los límites de grano de vuelven más visibles. La solución química utilizada va a depender del material de trabajo, la temperatura y el tiempo de ataque, además que, si el agente no es el indicado, no se podrá observa las características estructurales en el microscopio. En la tabla 10-2 se muestran las principales soluciones para el ataque químico en aceros (Llulluna, 2014, p.27). Las consideraciones para macro ataques químicos se encuentra en la norma ASTM E 304 y para realizar micro ataques se toma en cuenta la norma ASTM E 407 (Chávez, 2017, p.30).

Tabla 10-2: Soluciones utilizadas para ataque químico.

SOLUCIÓN	COMPOSICIÓN	EFECTO
Pical	Ácido pícrico 4 g Alcohol etílico 100 ml	Revela límites de gano de austenita en estructuras martensíticas, ferrita y perlita.
Nital 2%	Ácido nítrico 2 ml Alcohol etílico 110 ml	Realza la interfase entre carburos y en la matriz de ferrita-perlita.

Fuente: (Llulluna, 2014, p.28)

Realizado por: Huaraca A, 2021

2.11.4. Metalografía

Una muestra totalmente pulida se coloca en el microscopio óptico con un aumento de 50x o 100x para observar una macrografía y un aumento desde 200x hasta 2000x e incluso 100000x en microscopios electrónicos para obtener una microestructura con mayor detalle. Además, un enfoque adecuado permitirá la captura de una imagen limpia (Chávez, 2017, p.30).

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

Se presentan los equipos, probetas y parámetros con los que se va a realizar la soldadura. La soldadura se desarrolla en dos etapas, el análisis experimental donde se realizan las primeras pruebas y se observa el comportamiento en las diferentes fases de la soldadura, y el análisis final que es la segunda etapa donde ya se controlan los parámetros de soldadura definidos. Como resultado del análisis final se obtienen los elementos soldados a los que se les va a realizar la caracterización metalográfica. Finalmente, se presentan los equipos y condiciones para el análisis metalográfico de las juntas soldadas y para la medición de dureza.

3.1. Equipos

Para el proceso de soldadura por fricción es necesario un equipo robusto cuyo rango de velocidades sea alto. En este caso se hace uso de un torno equipado con un sistema de paro de emergencia adecuado para evitar cizalla en la junta debido al torque residual del mandril.

3.1.1. Torno ZMM SLIVEN CU 400

Un torno universal es una máquina-herramienta diseñada para trabajar con piezas con superficies internas y externas de revolución simétricas, además cuenta con accesorios adicionales que facilitan e incrementan la precisión en el trabajo (ZMM Bulgaria, 2020). El torno se convierte en el principal equipo para el desarrollo de esta investigación, es así que para realizar los ensayos de soldadura por fricción rotacionales se utiliza el torno ZMM SLIVEN CU 400x2000 que se encuentra en los talleres de Tecnodiseño ubicado en el sector Batzacón, Riobamba, Ecuador. En la figura 1-3 se presenta el equipo, mientras que en la tabla 1-3 se enlistan sus características técnicas.

Tabla 1-3: Características técnicas del torno ZMM SLIVEN CU 400x2000

DATOS TÉCNICOS	
Descripción	Torno universal ZMM SLIVEN CU 400 x 2000
Origen	Alemania
Longitud torneable máxima	2000 mm
Diámetro torneable sobre la bancada (máx.)	440 mm
Velocidad de giro máxima del husillo	2000 rpm
Demanda de potencia total	8,5 kW
Longitud del torno	3235 mm
Ancho del torno	1185 mm
Altura del torno	1286 mm
Peso del torno	2560 T

Fuente: (UniMAchines, 2021, p.1)

Realizado por: Huaraca A, 2021

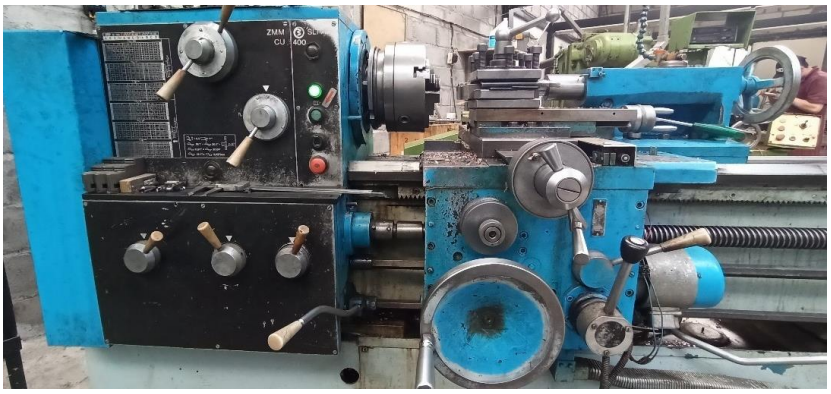


Figura 1-3: Torno ZMM SLIVEN CU 400x2000

Realizado por: Huaraca A, 2021.

3.1.2. Equipo de sujeción para ensayos de soldadura por fricción

Se utiliza un portabrocas para torno manual como equipo de sujeción del elemento fijo. En la figura 2-3 se muestra el portabrocas montado sobre el cabezal móvil del torno.

Figura 2-3: Portabrocas del torno ZMM SLIVEN CU 400x2000

Realizado por: Huaraca A, 2021.

El sistema de sujeción deberá soportar vibraciones provocadas por excentricidad entre la probeta de lado fijo y la del lado móvil, además que debe poseer un mecanismo para aplicar una presión de calentamiento controlada.

3.1.3. Prácticas de seguridad

Se recomienda tomar en cuenta las buenas prácticas de seguridad empleadas para trabajar con máquinas-herramientas como tornos y prensas de potencia, así como también contar con la guía para procedimiento de soldaduras de fricción. Los riesgos podrían incluir niveles altos de ruido, velocidades de rotación altas y desprendimiento de partículas cuando el equipo se encuentra en movimiento. Se sugiere implementar guardas y escudos mecánicos apropiados en la máquina, así como la conexión de interruptores de operación de dos manos por su parte los operadores deben llevar protección ocular y auditiva todo el tiempo (se requiere bloquear el ruido que la soldadura por fricción produce) y vestimenta adecuada para operar máquinas herramienta (Sanguña y Yépez, 2012, p.25).

3.1.4. Pirómetro portátil RAYTEK RAYNGER 3I PLUS

Un pirómetro es un dispositivo de medición de temperatura por infrarrojo, ideal para evitar daños o contaminación superficiales ya que no requiere estar en contacto con el producto para registrar un valor. En la figura 3-3. se muestra el pirómetro portátil RAYTEK RAYNGER 3I PLUS que se encuentra en el Laboratorio de Fundición de la Facultad de Mecánica – ESPOCH, que se utilizará para registrar la máxima temperatura alcanzada en la etapa de fricción del proceso de soldadura.

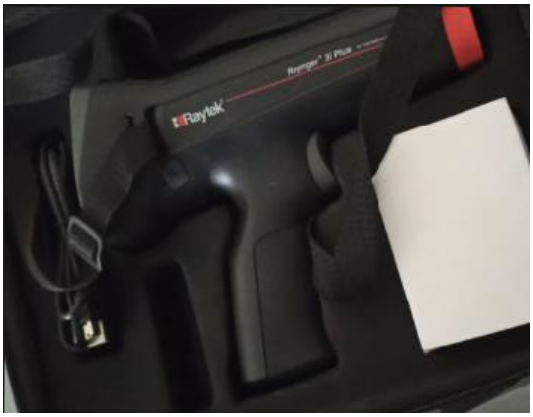


Figura 3-3: Pirómetro portátil RAYTEK RAYNGER 3I PLUS

Realizado por: Huaraca A, 2021.

3.2. Materiales

3.2.1. Probetas para ensayo

Para el proceso de soldadura por fricción rotacional se utilizan barras de acero estructural ASTM A36 de 15 mm de diámetro adquiridas en la empresa DIPAC en la cuidad de Riobamba.

3.3. Procedimiento de análisis

En la figura 4-3 se muestra el procedimiento que se va a seguir para realizar el ensayo de soldadura por fricción rotacional y su análisis.

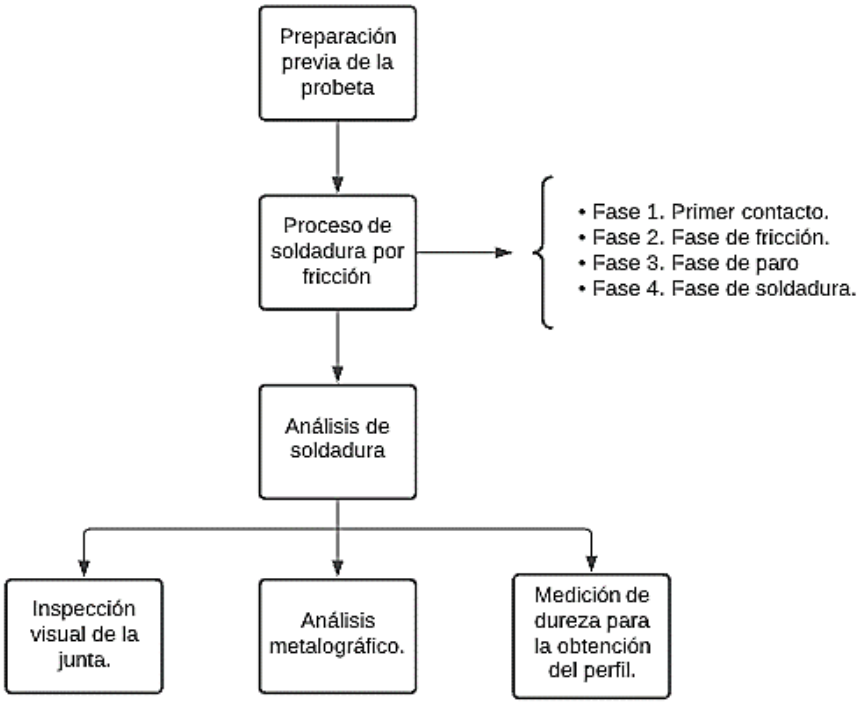


Figura 4-3: Procedimiento de análisis de la soldadura.

Realizado por: Huaraca A, 2021.

Por otro lado, las actividades que se realizan únicamente para la junta soldada son las que se enlistan a continuación:

1) Preparar las barras de acero que van a ser soldadas. Mediante proceso de desbaste se retira la capa superficial que presentan las barras de acero como residuo de los procesos de manufactura a los que fue sometida.
2) Montar la probeta móvil en el mandril del torno.
3) Montar la probeta fija en el cabezal móvil del torno.

4) Alinear y centrar las probetas.
5) Realizar el ajuste final de las probetas para la fijación final.
6) Poner en marcha el torno y generar el primer contacto entre las superficies.
7) Iniciar el avance del cabezal móvil para iniciar la plastificación del material.
8) Detener el movimiento del mandril cuando se alcance la distancia plastificada necesaria.
9) Para evitar el corte en la junta se debe aplicar un avance mayor después de que se detiene el movimiento.

3.4. Preparación de las probetas

La longitud de las probetas de acero se establece en 90mm y la longitud en voladizo de las mismas será de 50mm, esto con el fin de evitar vibraciones por acción del pandeo. Es necesario realizar un desbaste de las superficies que van a estar en contacto para eliminar irregularidades en las superficies que se generan con el corte. De igual manera es necesario realizar un desbaste longitudinal, esto con el fin de eliminar la capa superficial de calamina con la que se encuentran recubiertas las barras de acero como residuo de los procesos de manufactura a los que fue sometida, obtenido una superficie mecanizada de 14mm de diámetro y 20mm de largo en cada una de las probetas. El desbaste longitudinal se realiza para evitar la contaminación en la superficie soldada y posteriormente obtener resultados mucho más reales en la microestructura y espectrometría.

La probeta que se monta en el cabezal móvil además se somete a un desbaste en la zona de agarre con el portabrocas. En la figura 5-3 se presenta el esquema de la probeta que se monta en el mandril y en el cabezal móvil y en la figura 6-3 y figura 7-3 se muestra las probetas en condiciones para el ensayo respectivamente.

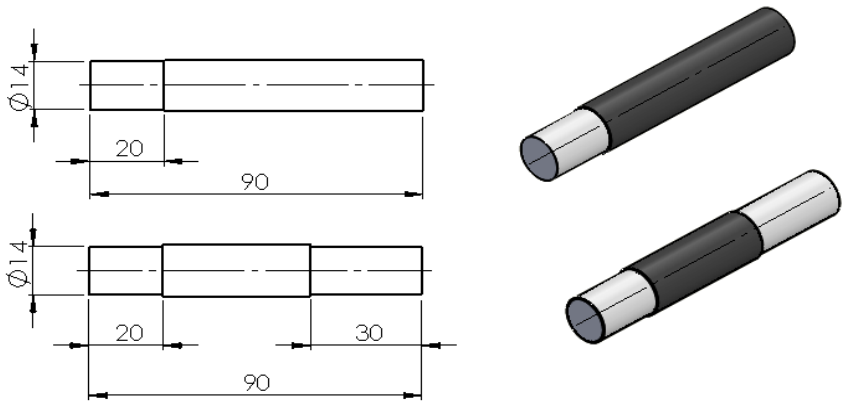


Figura 5-3: Esquema de las probetas para ensayo.

Realizado por: Huaraca A, 2021.

Figura 6-3: Probeta para el cabezal móvil.

Realizado por: Huaraca A, 2021.

Figura 7-3: Probeta para el mandril.

Realizado por: Huaraca A, 2021.

3.5. Parámetros de soldadura

El acero estructural ASTM A36 posee una concentración media de carbono de alrededor de 0,29%, razón por la cual los valores presentados para el acero AISI 1018 se tomarán como valores mínimos y los valores para el acero AISI 1045 como valores máximos de acuerdo a lo que se presenta en la tabla 2-3.

Tabla 2-3: Parámetros referenciales iniciales de soldadura

Material	Diámetro (mm)	Velocidad (RPM)	Tiempo (s)	Presión de Calentamiento (kg/cm2)
Acero AISI 1018	12	2400	16	100
Acero AISI 1045	12	2400	16	100
Aluminio	12	2400	12	110
Cobre electrolítico	12	2400	20	150

Fuente: (Castro Lisintuña 2018)

Se tomarán estos valores como punto inicial del desarrollo de los ensayos en acero ASTM A36. Ya que el diámetro mecanizado de la probeta para este ensayo es mayor, el tiempo de calentamiento aumentará ya que existe una superficie mayor de material para plastificar. Por otro lado, la velocidad se considera una variable controlada con la que se analizará la calidad final de

la junta y que se definió de acuerdo a las limitaciones del equipo. Finalmente, los parámetros con los que se desarrollan las soldaduras se presentan en la tabla 3-3.

Tabla 3-3: Parámetros finales de soldadura

	VELOCIDAD RPM	LONGITUD PLASTIFICADA mm	TIEMPO DE FRENADO seg	TIEMPO DE CALENTAMIENTO seg
Acero ASTM A36	1000	8 mm	3	20
	1250			
	1500			

Realizado por: Huaraca A, 2021.

3.6. Etapas de soldadura

3.6.1. Fase 1. Primer contacto

En la fase de primer contacto, se produce un cambio de temperatura abrupto que va desde 0°C hasta 600°C aproximadamente, en un reducido intervalo de tiempo. En la figura 8-3 se muestra las probetas un instante antes de realizar el primer contacto, mientras que en la figura 9-3 se puede observar el cambio de coloración en las barras de acero cuando las superficies ya se ponen en contacto.

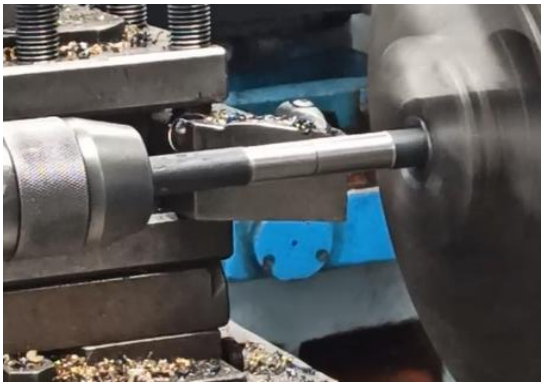


Figura 8-3: Fase previa al primer contacto.

Realizado por: Huaraca A, 2021.

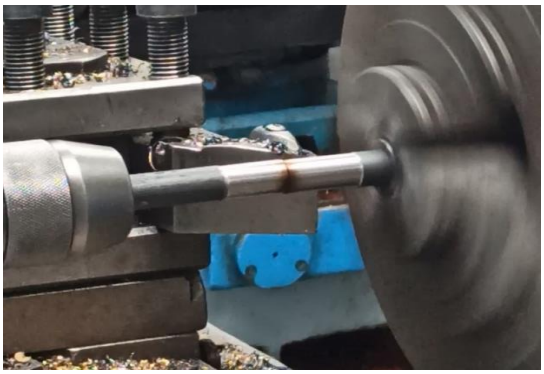


Figura 9-3: Fase del primer contacto.

Realizado por: Huaraca A, 2021.

3.6.2. Fase 2. Fase de fricción

En la fase de fricción el material se plastifica formando el destello característico del proceso y se evidencia la expulsión de material a la periferia. La presión de fricción constante se asegura con un avance constante del cabezal móvil del torno. En la figura 10-3 se muestra la zona de material plastificado.

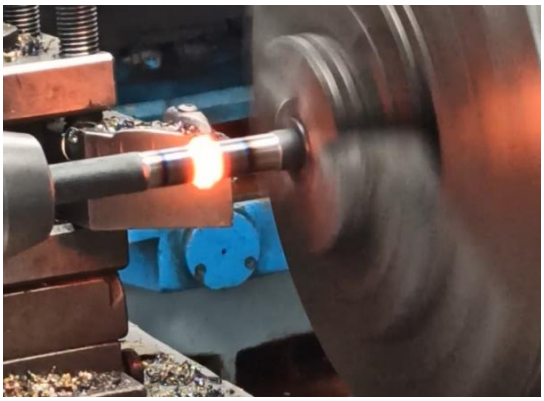


Figura 10-3: Fase de fricción.

Realizado por: Huaraca A, 2021.

3.6.3. Fase 3. Fase de paro

El torno cuenta con un sistema de paro de emergencia lo que asegura un paro del equipo en muy corto tiempo. En la figura 11-3 se muestra el estado de las probetas cuando el movimiento de los elementos empieza a cesar.

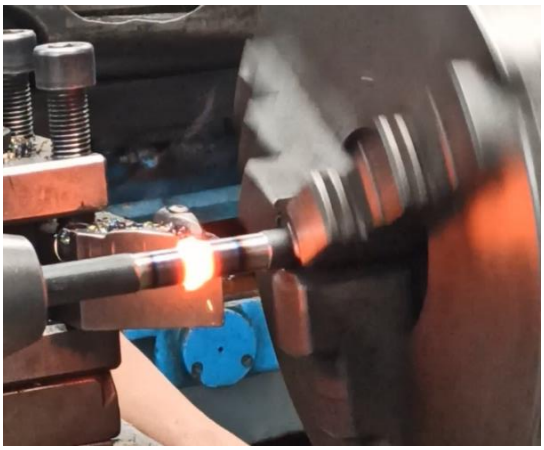


Figura 11-3: Fase de paro.

Realizado por: Huaraca A, 2021.

3.6.4. Fase 4. Fase de soldadura

De forma inmediata cuando el movimiento termina, se aplica un avance mayor, igual al doble o incluso mayor al avance que se tenía en la fase de fricción. En la figura 12-3 se muestra el estado final de la probeta.

Figura 12-3: Fase de soldadura.

Realizado por: Huaraca A, 2021.

3.7. Proceso de soldadura

3.7.1. Análisis experimental

Para el análisis experimental se realizan ensayos combinando velocidad, tiempo de calentamiento y avance del cabezal móvil, hasta obtener una capa uniforme de material expelido en la periferia.

En la tabla 4-3 se presentan las probetas ensayadas en la etapa experimental, además con la ayuda del pirómetro se registra la temperatura máxima que se alcanza durante del proceso.

Tabla 4-3: Análisis experimental de las probetas

VELOCIDAD RPM	DENOMINACIÓN	TEMPERATURA MÁXIMA °C	TIEMPO DE ENSAYO seg	REFERENCIA GRÁFICA
1000	1000P1	1047	25	
	1000P2	1024	18	
	1000P3	1005	20	
1250	1250P1	1014	17	
	1250P2	1023	15	
	1250P3	1008	17	
1500	1500P1	1013	20	
	1500P2	1095	16	

Realizado por: Huaraca A, 2021.

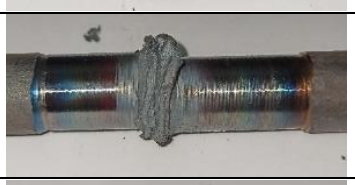
3.7.2. Análisis final

El análisis final se realizará con el avance adecuado obtenido al final del análisis experimental. En la figura 13-3 se muestra una probeta en análisis experimental y una probeta en análisis final del proceso de soldadura. En la tabla 5-3, 6-3 y 7-3 se presentan las soldaduras del análisis final

Figura 13-3: Probeta ensayada en proceso experimental (inferior) y en proceso final (superior)

Realizado por: Huaraca A, 2021.

Tabla 5-3: Análisis final de las probetas a 1000 RPM

DENOMINACIÓN	TEMPERATURA MÁXIMA °C	TIEMPO DE ENSAYO seg	REFERENCIA GRÁFICA
1000-1	1065	25	
1000-2	1003	18	
1000-3	1107	21	
1000-4	1054	21	
1000-5	1088	27	

Realizado por: Huaraca A, 2021.

Tabla 6-3: Análisis final de las probetas a 1250 RPM

DENOMINACIÓN	TEMPERATURA MÁXIMA °C	TIEMPO DE ENSAYO seg	REFERENCIA GRÁFICA
1250-1	1017	19	
1250-2	1021	16	
1250-3	1037	26	
1250-4	1068	26	
1250-5	1073	19	

Realizado por: Huaraca A, 2021.

Tabla 7-3: Análisis final de las probetas a 1500 RPM

DENOMINACIÓN	TEMPERATURA MÁXIMA °C	TIEMPO DE ENSAYO seg	REFERENCIA GRÁFICA
1500-1	1056	12	
1500-2	1045	24	
1500-3	1011	21	
1500-4	1105	28	
1500-5	1103	18	

Realizado por: Huaraca A, 2021.

3.8. Inspección visual

Antes de iniciar con los ensayos metalográficos, es necesario realizar una inspección visual para descartar imperfecciones y discontinuidades producidas durante el proceso de soldadura. De acuerdo a la norma AWS B1.11M/B1.11:2015 *Guide for the visual examination of Weld*.

3.9. Metodología para el análisis metalográfico

3.9.1. Norma

Para realizar la caracterización metalográfica se realiza un corte longitudinal en los elementos soldados. Para esto se hace uso de las recomendaciones que la norma ASTM E3-95 para la preparación de especímenes metalográficos, donde se utilizará un método de corte con un constante régimen de enfriamiento para evitar transformaciones a nivel estructural. (ASTM E3-95 2016)

3.9.2. Equipo

Para los ensayos metalográficos de las probetas se utiliza el microscopio óptico marca Buehler Ltd que se encuentra en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Mecánica – ESPOCH. En la figura 14-3 se muestra el equipo utilizado.

Figura 14-3: Microscopio óptico

Realizado por: Huaraca A, 2021.

3.9.3. Micrografía

Las micrografías se toman con lentes objetivos de 10X, 20X y 50X, donde se obtiene una resolución de 760, 380 y 130 micrómetros respectivamente. Según la norma ASTM E407, para el ataque químico se utiliza Nital al 5%.

3.10. Metodología para realización de ensayos dureza

3.10.1. Dureza Vickers

3.10.1.1. Norma

Para calcular la dureza Vickers en una sección se hace uso de las ecuaciones de la norma ASTM E 384 – 05 titulada Método Estándar de Microidentación de Dureza de Materiales. La carga aplicada para medir la dureza es de 0,2kg en un intervalo de tiempo de 10s y las mediciones serán tomadas en cada una de las fases que el material presenta a partir del centro del cordón de soldadura (ASTM Subcommittee E28.06 2005).

3.10.1.2. Equipo

En la figura 15-3 se muestra el equipo para medición de microdureza Vickers, marca Buehler que se encuentra en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Mecánica – ESPOCH

Figura 15-3: Equipo de microdureza Vickers

Realizado por: Huaraca A, 2021.

3.10.1.3. Probeta

La probeta debe contar con una superficie espejo además que se debe desbastar la sección circular posterior para tener una superficie plana de apoyo. En la figura 16-3 se muestran las probetas adecuadas para la medición de dureza.

Figura 16-3: Perfil de la probeta para el ensayo Vickers

Realizado por: Huaraca A, 2021.

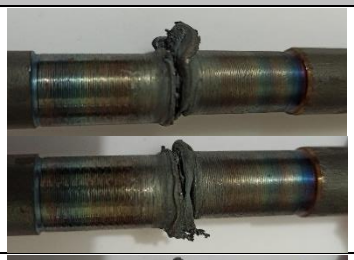
CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Inspección visual

De acuerdo a la norma AWS B1.11M/B1.11:2015 la cual entrega los parámetros de evolución para la inspección visual de las juntas, se determinan las probetas aptas para ser sometidas al análisis metalográfico y las probetas que se descartan por fusión incompleta en el cordón. Las probetas descartadas se encuentran clasificadas en la tabla 1-4, tabla 2-4 y tabla 3-4 respecto a la velocidad de ensayo. Además, se registra el espesor de la separación que se presenta entre las superficies.

Tabla 1-4: Probetas ensayadas a 1000 RPM, descartadas por inspección visual

VELOCIDAD RPM	DENOMINACIÓN	FUSIÓN INCOMPLETA PROMEDIO mm	REFERENCIA GRÁFICA
1000	1000-1	0,50	
	1000-4	0,25	

Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 2-4: Probetas ensayadas a 1250 RPM, descartadas por inspección visual

VELOCIDAD RPM	DENOMINACIÓN	FUSIÓN INCOMPLETA PROMEDIO mm	REFERENCIA GRÁFICA
1250	1250-2	0,20	
	1250-5	0,95	

Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 3-4: Probetas ensayadas a 1500 RPM, descartadas por inspección visual

VELOCIDAD RPM	DENOMINACIÓN	FUSIÓN INCOMPLETA PROMEDIO mm	REFERENCIA GRÁFICA
1500	1500-1	0,17	
	1500-5	0,80	

Realizado por: Huaraca A, 2021

4.2. Análisis metalográfico

De manera visual, en el corte transversal realizado a la probeta que se muestra en la figura 1-4 se identifican las zonas de afectación térmica. La primera zona, la zona ZM corresponde a la zona de material mezclado o de fusión de material y se muestra como una zona uniforme y delgada en el centro de la probeta. La segunda es la zona de afectación térmica que se presenta como una

zona mucho más amplia y que se encuentra alrededor de la ZM, esta zona a su vez se subdivide en dos zonas la ZTA y la ZTMA. En la zona ZTMA produce una deformación plástica del material además de sufrir una afectación térmica, mientras que en la ZTA únicamente se produce una afectación térmica. Finalmente, en los extremos se presenta la zona MB que corresponde al material base que no ha sido alternado de ninguna forma durante el proceso.

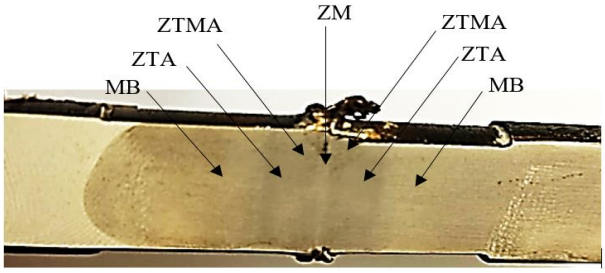


Figura 1-4: Zonas de afectación térmica

Realizado por: Huaraca A, 2021.

En cada una de las zonas de afectación térmica que se observan es necesario realizar el análisis micrográfico. En la tabla 4-4 se presentan las imágenes correspondientes a la microestructura que presenta el acero ASTM A36 en su forma base. Se observa una microestructura ferrítica (zonas blancas) y la presencia de perlita (zonas oscuras), ambas con límites de grano bien definidos que se puede apreciar mucho mejor al utilizar el lente objetivo de 500x. La distribución de perlita corresponde al porcentaje de carbono que un acero estructural ASTM A36 debe presentar. En la tabla 5-4 se presenta una zona de transición entre el material base MB y la zona de afectación térmica ZTA. En esta zona de transición se observa un desorden en los límites de grano producido por el incremento de temperatura que ha sufrido el material y el que es mucho más notorio con la perlita. Posteriormente los granos de perlita comienzan a reorganizarse en estructuras más pequeñas lo que es una característica de la zona ZTA y que se muestra en la tabla 6-4.

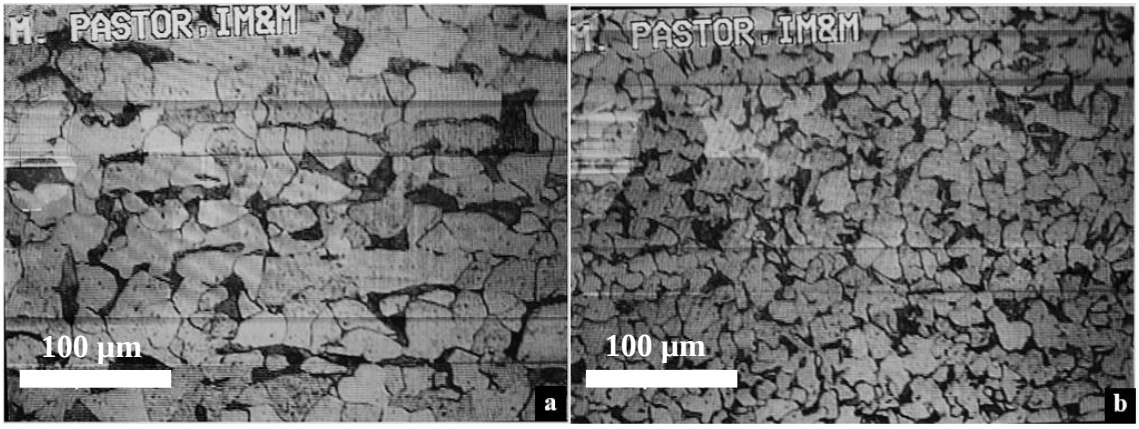


Figura 2-4: Comparación entre ZM (a) y ZTA (b). Probeta 1000-5 magnificación 200x

Realizado por: Huaraca A, 2021.

Al comparar la micrografía en la zona MB con la zona ZTA, se observa que el tamaño de grano disminuye, a diferencia de las otras técnicas de soldadura en las cuales se observa un crecimiento de grano respecto al material base. Esta comparación se observa en la figura 2-4 donde además se observa mayor presencia de perlita en el material base que en la ZTA. Por otro lado, en la tabla 7-4 y tabla 8-4 se presentan estructuras totalmente diferentes a las presentadas en las dos zonas anteriores.

En la zona ZTMA se observa que, a partir de los granos de perlita, se forman granos alargados ramificados tipo aguja rodeados por perlita acicular, a este tipo de estructura se la conoce como ferrita Widmanstatten. Esta zona se presenta como una zona de transición ya que la temperatura alcanzada no es suficiente para alcanzar la recristalización completa como la que se tiene en la zona de mezclado o ZM. En la figura 3-4 se presenta se presenta una comparación entre la zona ZTMA y la zona de fusión del material ZM.

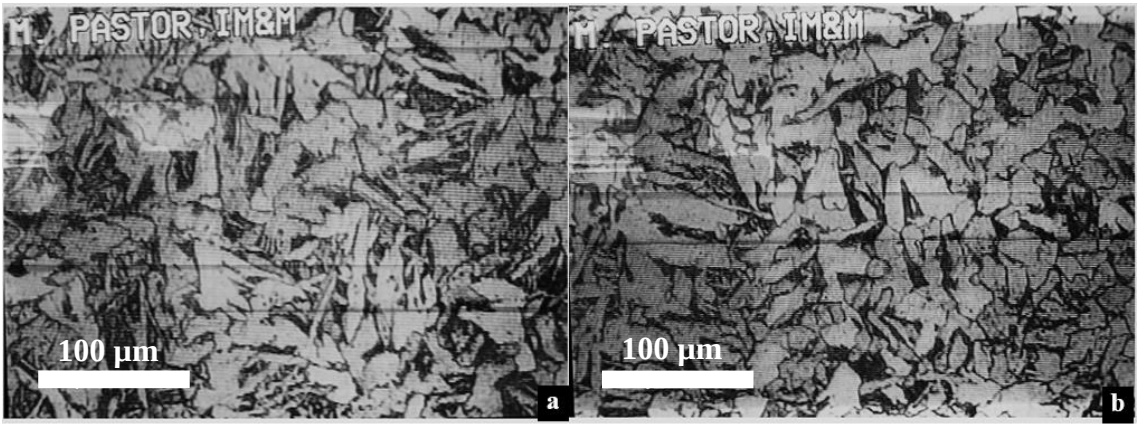


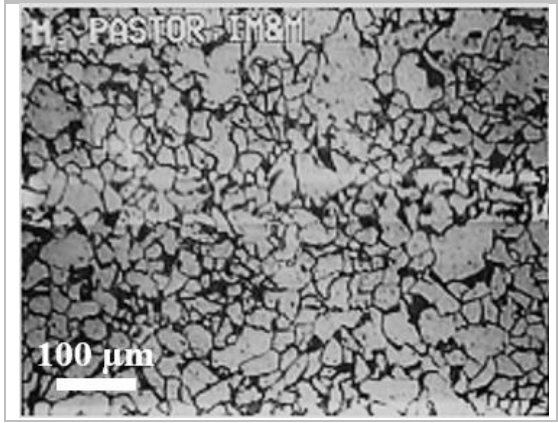
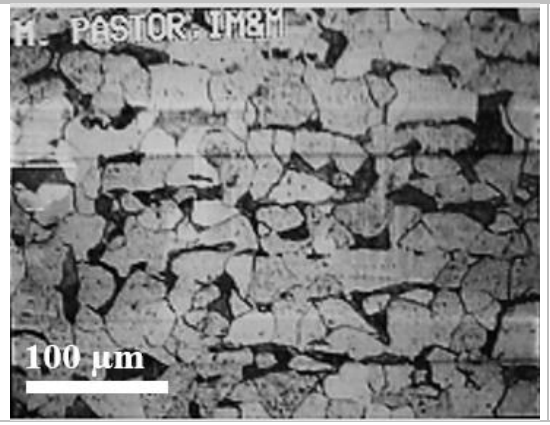
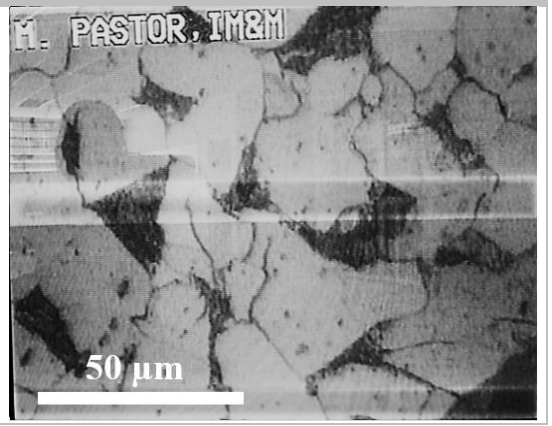
Figura 3-4: Comparación entre ZTMA (a) y ZM (b). Probeta 1000-5 magnificación 200x

Realizado por: Huaraca A, 2021.

Las zonas que se presentan a la izquierda y derecha respecto a la zona ZM de una probeta presentan las mismas características a nivel micrográfico, lo mismo ocurre para las probetas analizadas a 1000 RPM, 1250 PRM y 1500 RPM. La diferencia encontrada entre las velocidades de ensayo y las zonas de afectación térmicas es que a medida que la velocidad aumenta, las zonas de transición disminuyen y también la zona de afectación térmica.

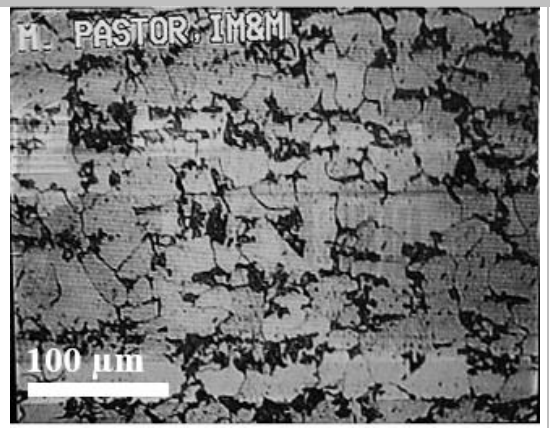
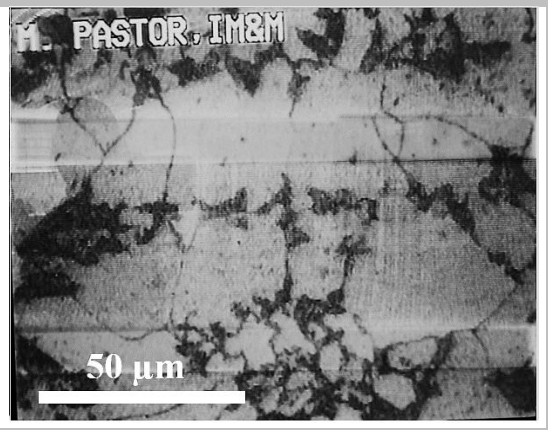
Desde la tabla 9-4 hasta la tabla 17-4 se presentan cada una de las micrografías obtenidas para cada de las probetas ensayadas.

Tabla 4-4: Micrografía del material base. Probeta 1000-5

100X	200X	500X
		

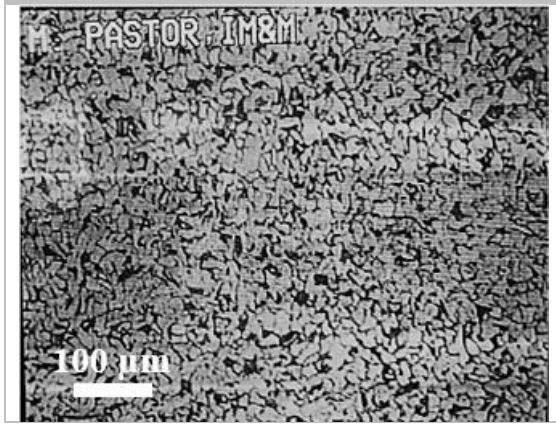
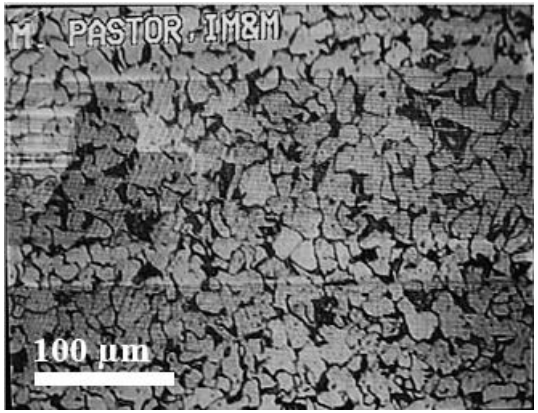
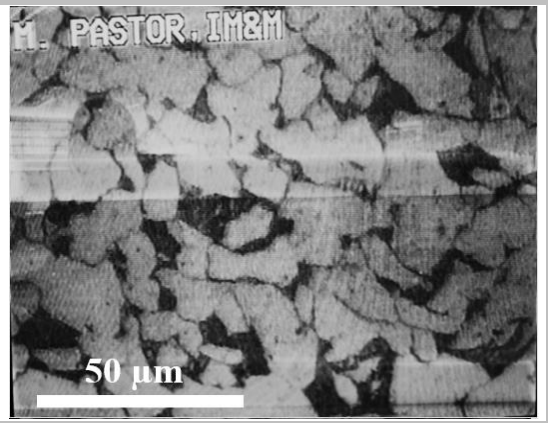
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 5-4: Micrografía de la zona de transición entre ZM y ZTA. Probeta 1000-5

100X	200X	500X
		

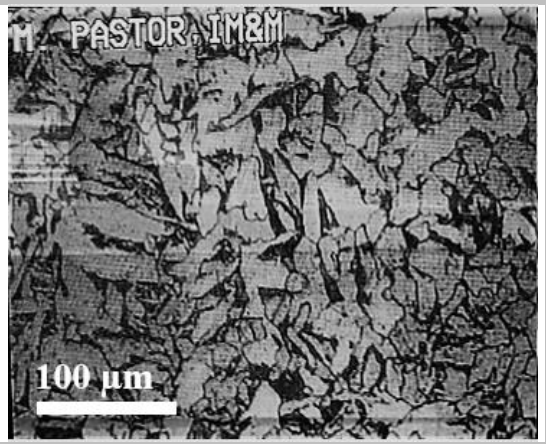
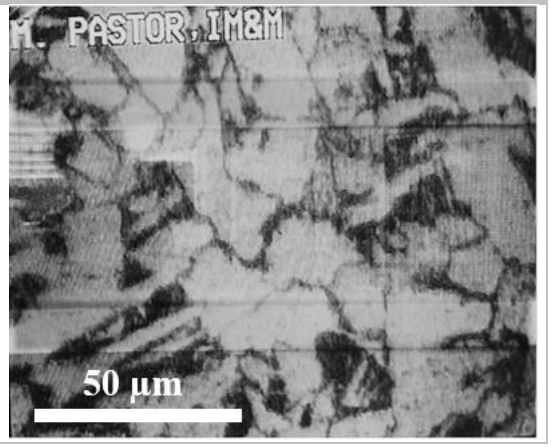
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 6-4: Micrografía de la zona ZTA. Probeta 1000-5

100X	200X	500X
		

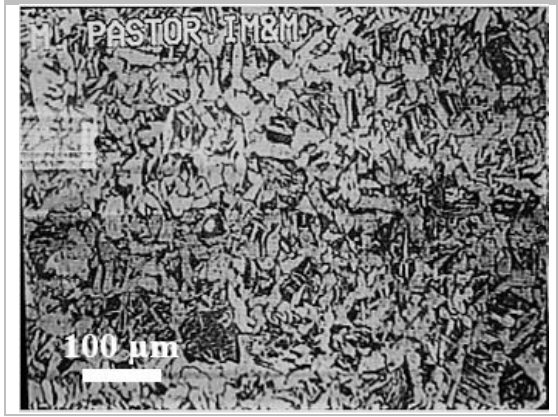
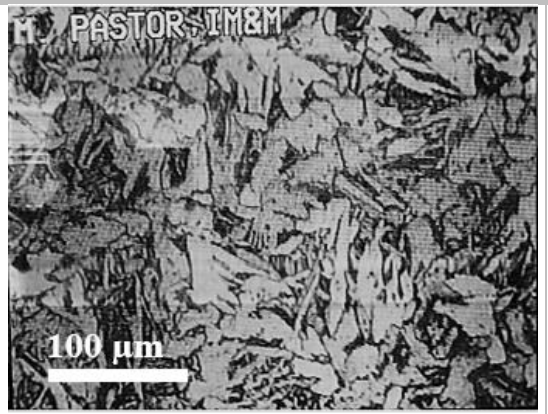
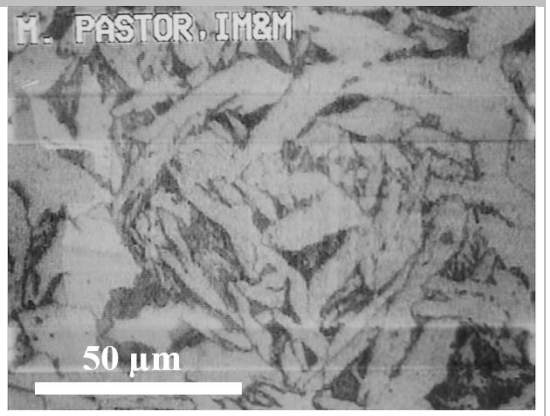
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 7-4: Micrografía de la zona ZTMA. Probeta 1000-5

100X	200X	500X
		

Realizado por: Huaraca A, 2021

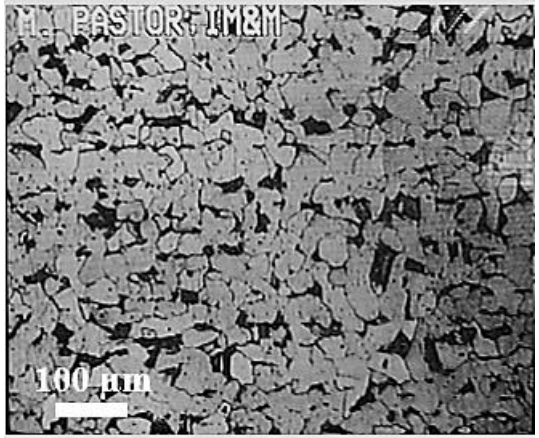
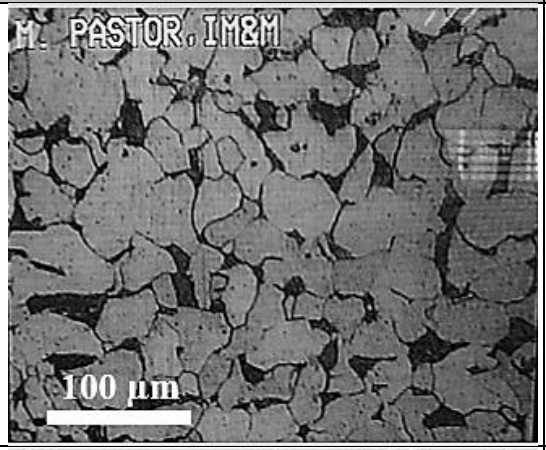
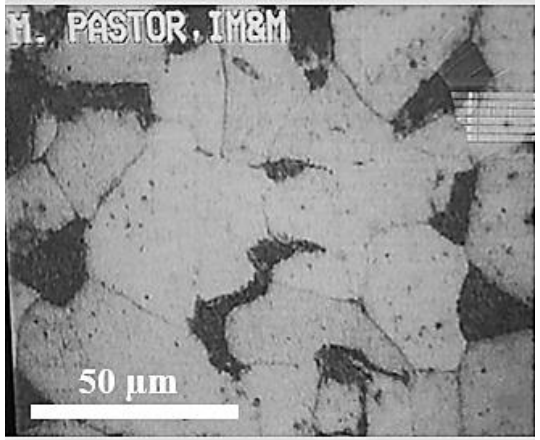
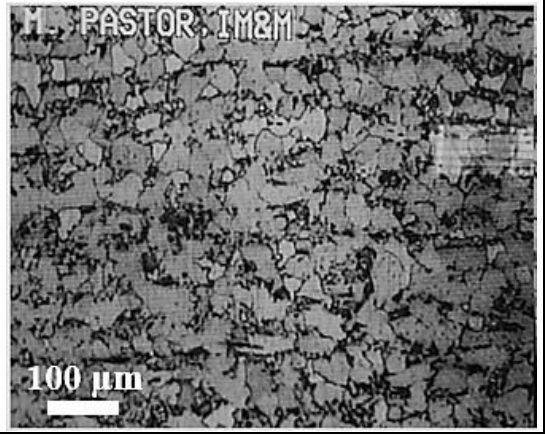
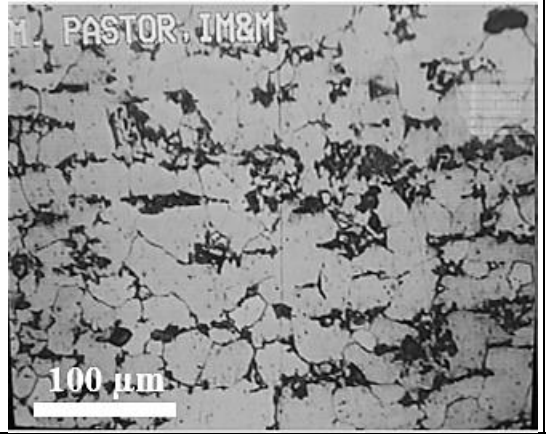
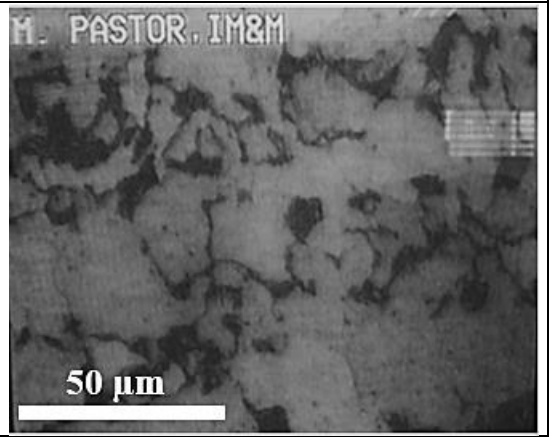
Tabla 8-4: Micrografía de la zona ZM. Probeta 1000-5

100X	200X	500X
		

Realizado por: Huaraca A, 2021

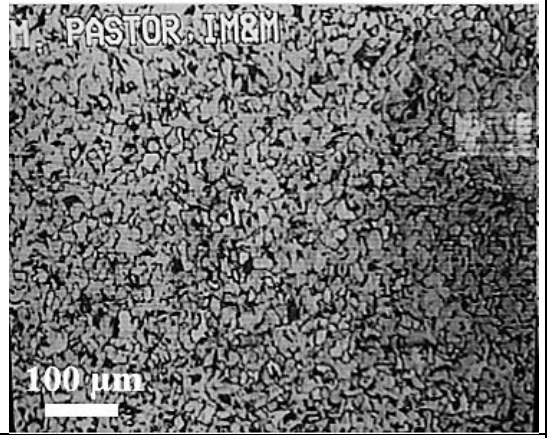
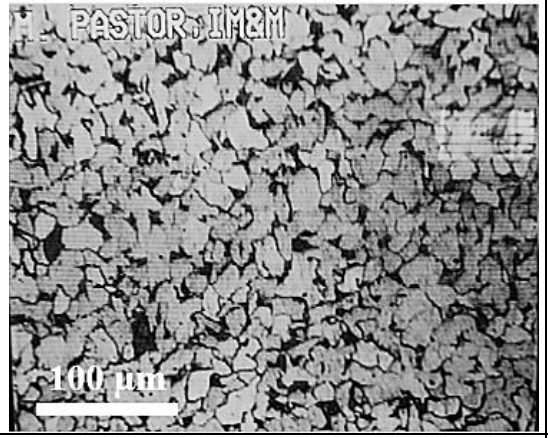
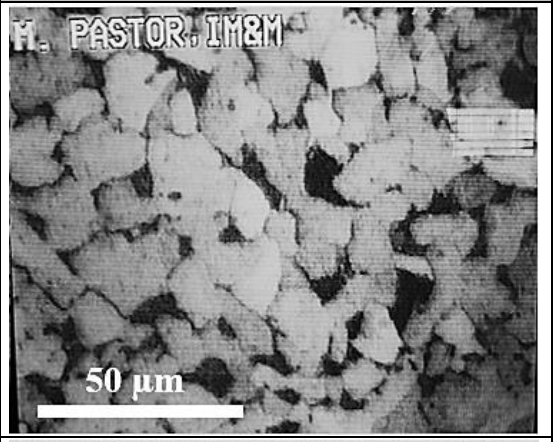
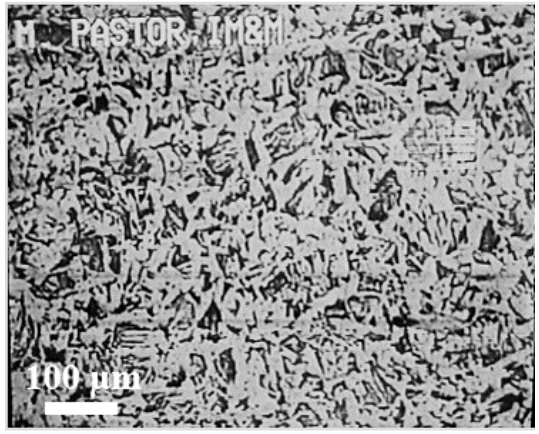
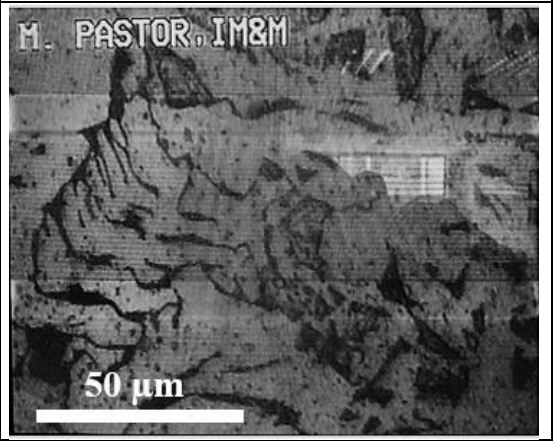
Con la ayuda de la tabla 18-4 se realiza un análisis comparativo de todas las zonas de afectación térmica, respecto a la velocidad de ensayo. En la zona de transición entre el material base y la zona de afectación térmica, se puede observar que existe una mayor concentración de perlita en la fotomicrografía correspondiente al ensayo realizado a 1500 RPM, para las imágenes restantes se observa una concentración similar. La micrografía correspondiente al ensayo realizado a 1250 RPM presenta una ligera concentración de ferrita mayor que la del ensayo realizado a 1000 RPM. En la zona de afectación térmica se presenta algo parecido a lo descrito anteriormente, la mayor concentración de ferrita se presenta en el ensayo realizado a 1500 RPM, mientras que para las demás velocidades de ensayo se observan micrografías similares. En la tercera zona, la zona de afectación térmica y mecánica se observa que la concentración de carbono en el ensayo realizado a 1000 RPM es mayor que la obtenida con el ensayo de 1250 RPM, pero de igual manera que en los dos casos anteriores, el ensayo realizado a 1500 RPM entrega como resultado una fotomicrografía con mayores concentraciones de ferrita respecto a las dos velocidades de ensayo. Por último, en la zona de mezcla de material se observa una situación completamente diferente a las que hasta ahora se describieron, la mayor concentración de ferrita se obtiene en el ensayo realizado a 1000 RPM seguido del ensayo realizado a 1500 RPM y por último la del ensayo realizado a 1250 RPM.

Tabla 9-4: Micrografías de la probeta 1000-2

ZONA	100X	200X	500X
MATERIAL BASE			
ZONA DE TRANSICIÓN			

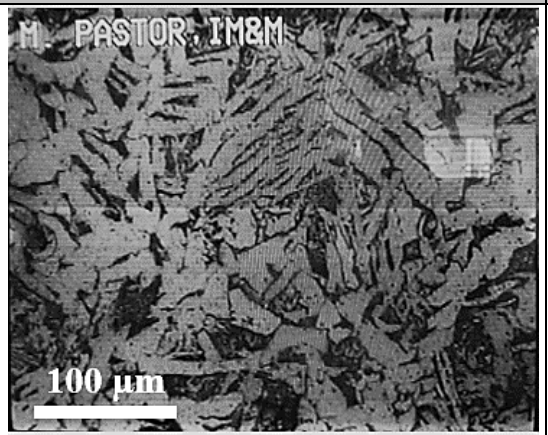
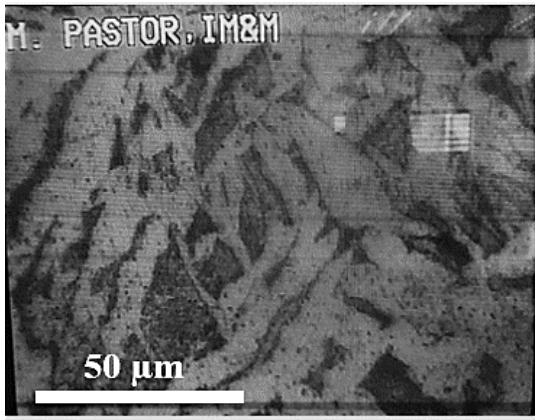
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 9-4: Micrografías de la probeta 1000-2 (Continuación)

ZONA	100X	200X	500X
ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA			
ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA Y MECÁNICA			

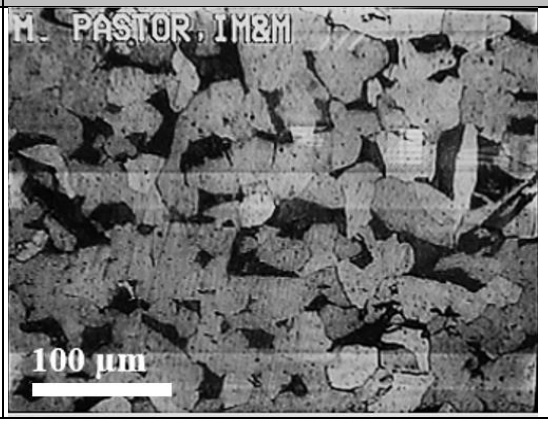
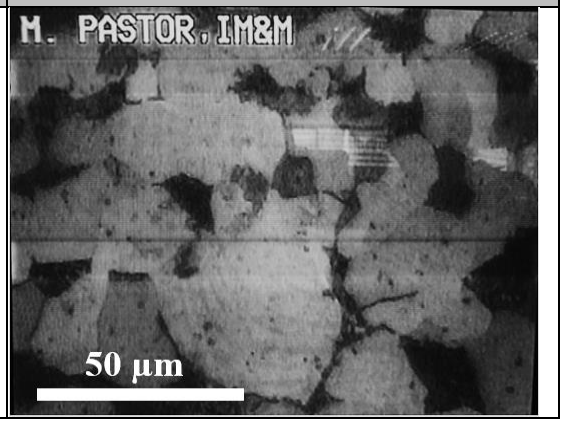
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 9-4: Micrografías de la probeta 1000-2 (Continuación)

ZONA	100X	200X	500X
ZONA DE MEZCLA			

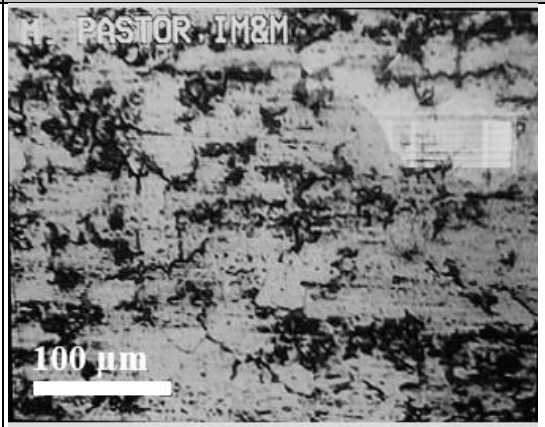
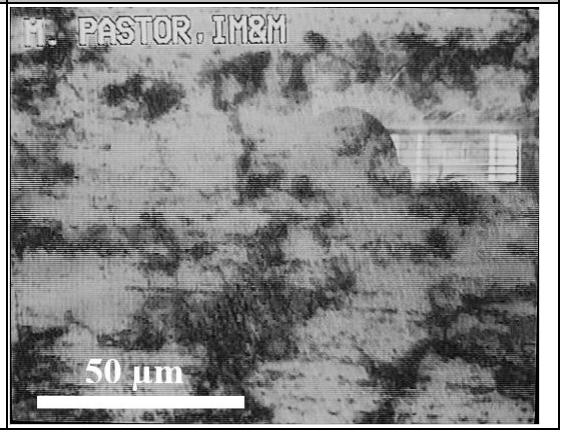
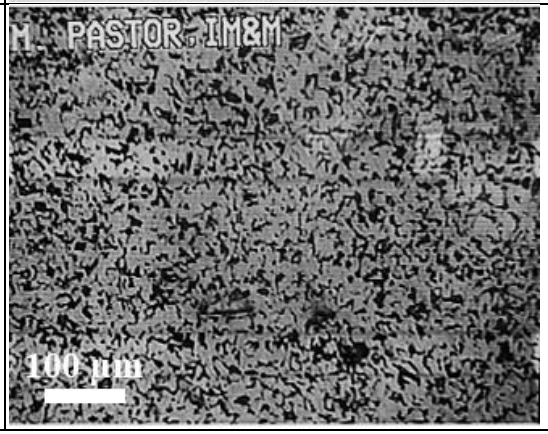
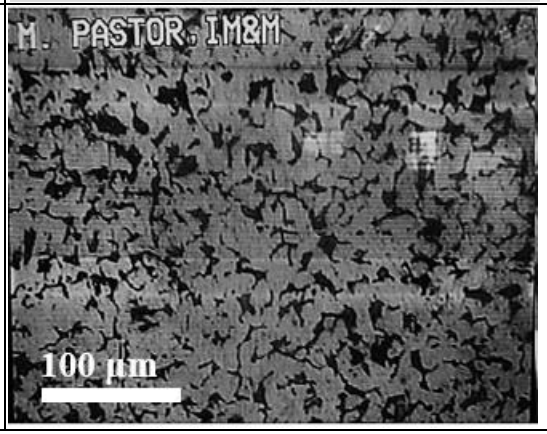
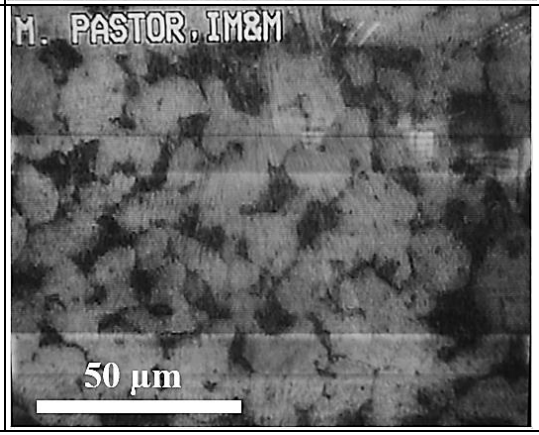
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 10-4: Micrografías de la probeta 1000-3

ZONA	100X	200X	500X
MATERIAL BASE			

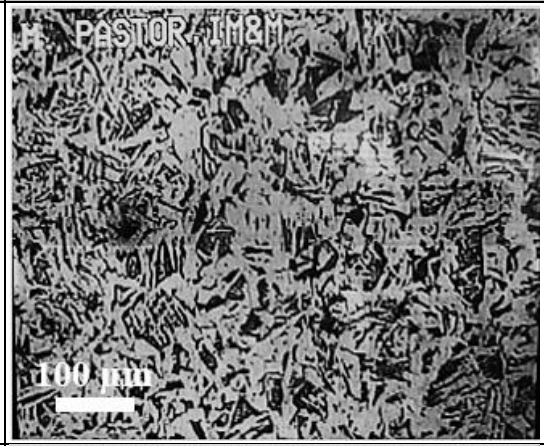
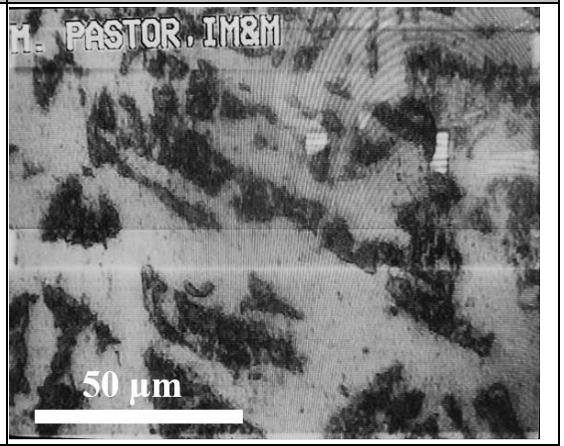
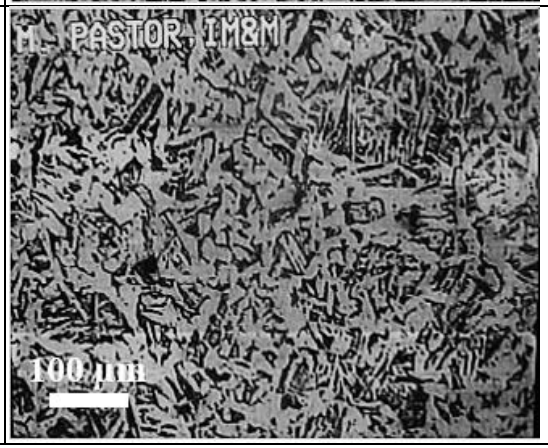
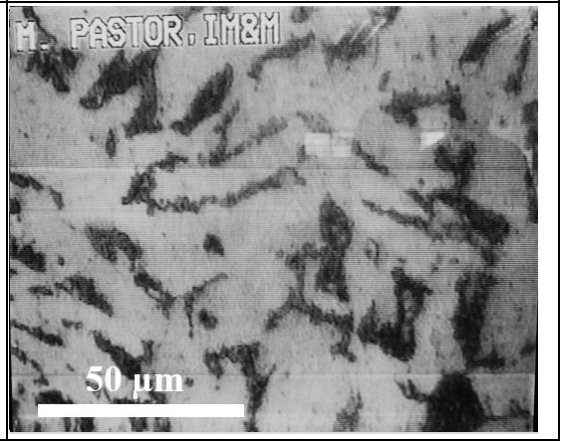
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 10-4: Micrografías de la probeta 1000-3 (Continuación)

ZONA	100X	200X	500X
ZONA DE TRANSICIÓN			
ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA			

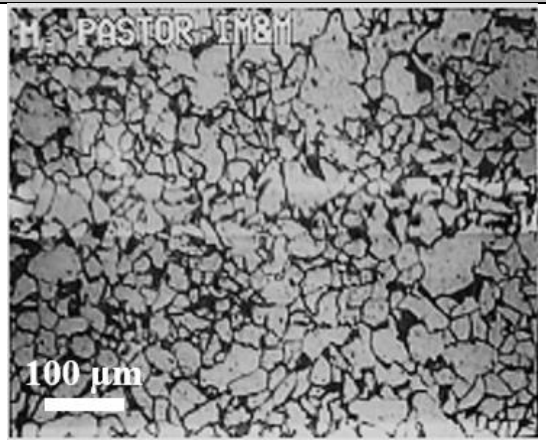
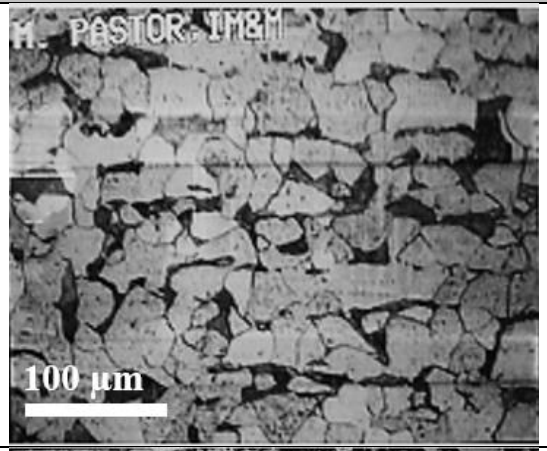
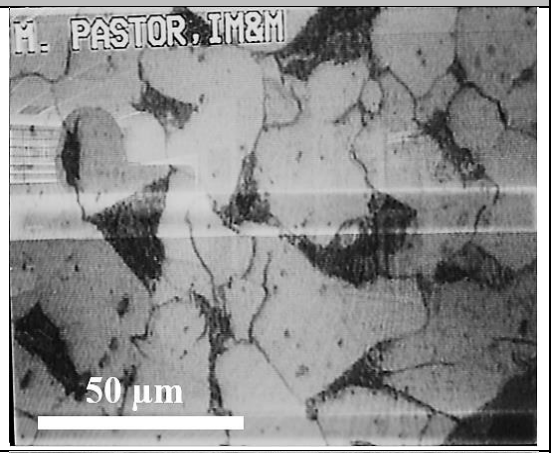
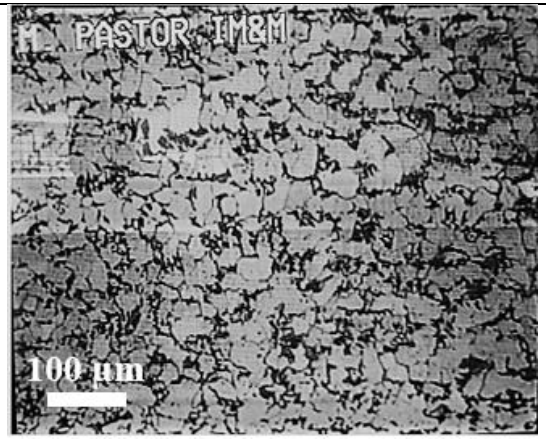
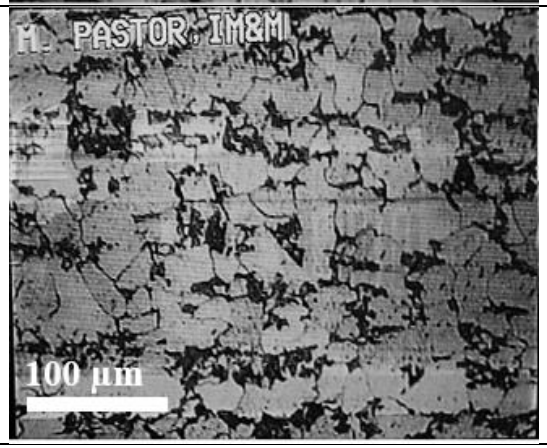
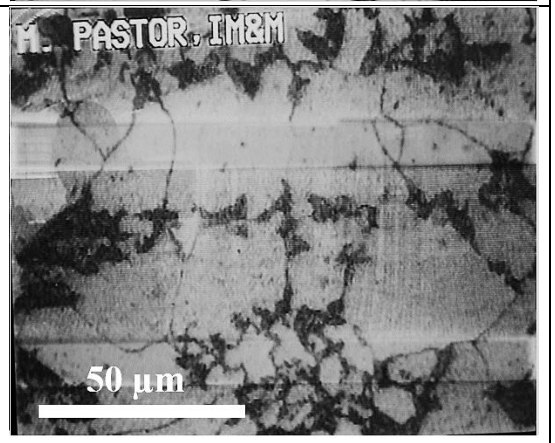
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 10-4: Micrografías de la probeta 1000-3 (Continuación)

ZONA	100X	200X	500X
ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA Y MECÁNICA			
ZONA DE MEZCLA			

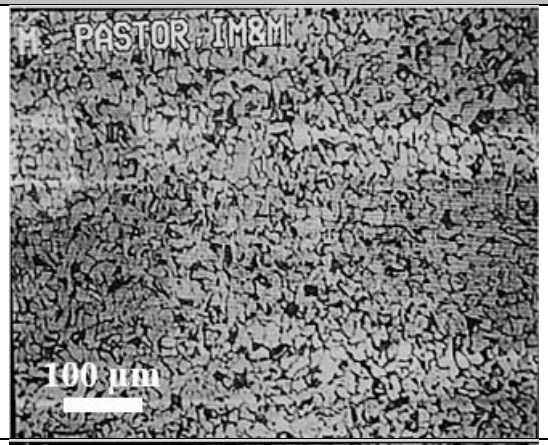
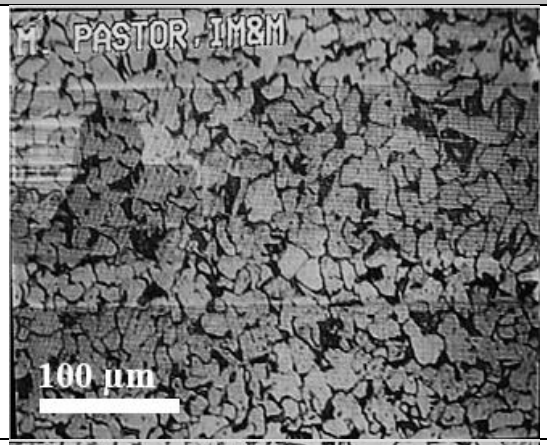
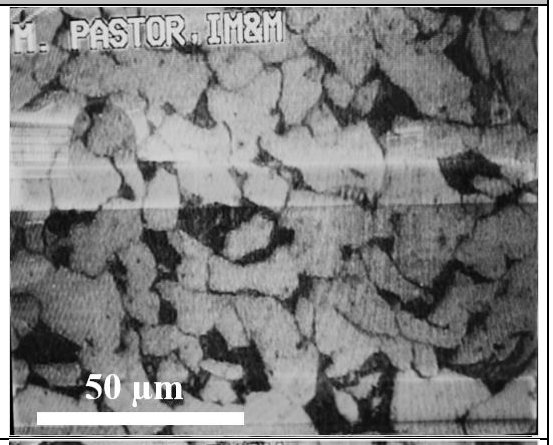
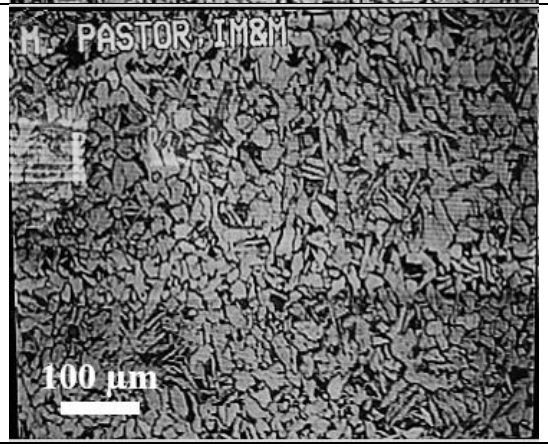
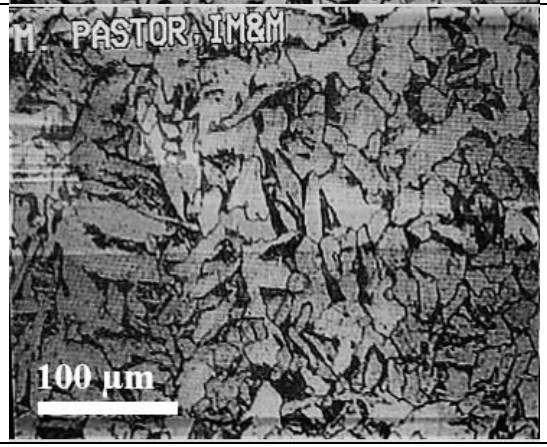
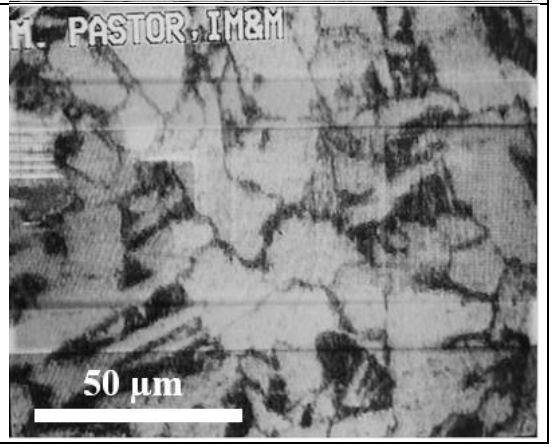
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 11-4: Micrografías de la probeta 1000-5

ZONA	100X	200X	500X
MATERIAL BASE			
ZONA DE TRANSICIÓN			

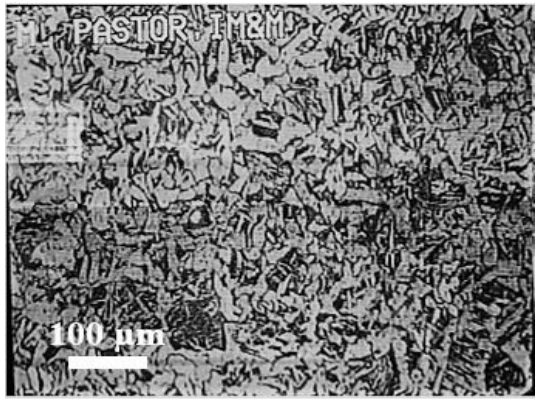
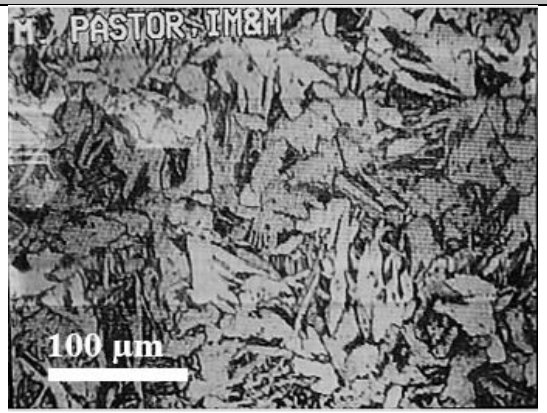
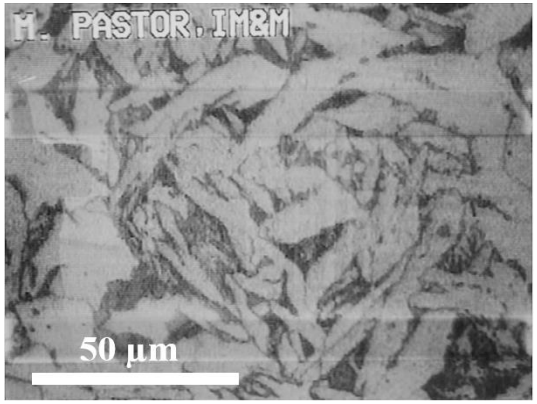
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 11-4: Micrografías de la probeta 1000-5 (Continuación)

ZONA	100X	200X	500X
ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA			
ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA Y MECÁNICA			

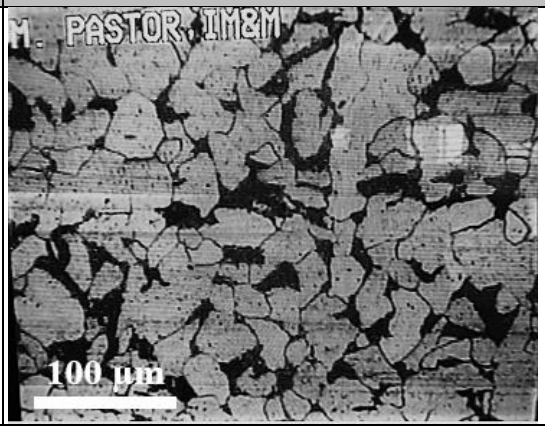
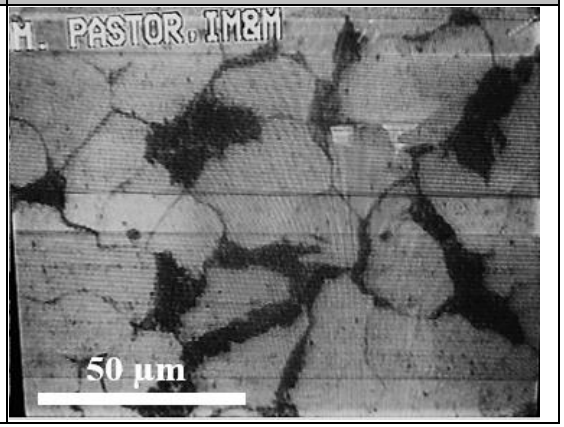
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 11-4: Micrografías de la probeta 1000-5 (Continuación)

ZONA	100X	200X	500X
ZONA DE MEZCLA			

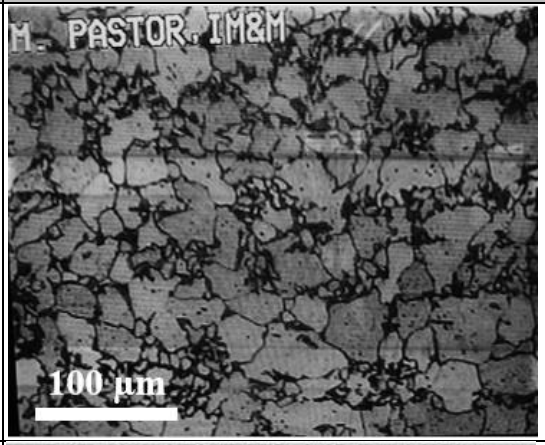
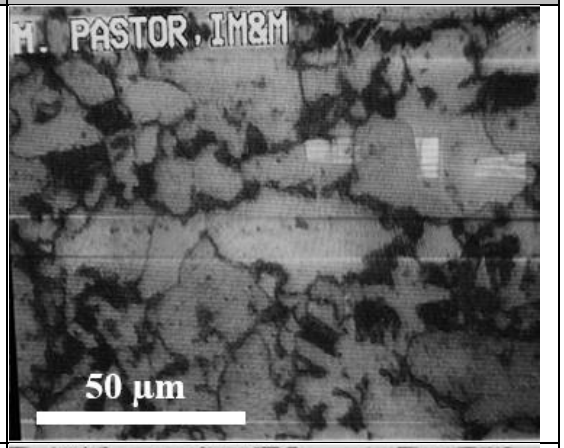
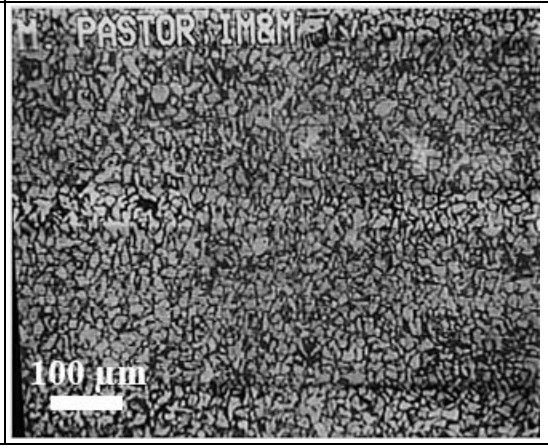
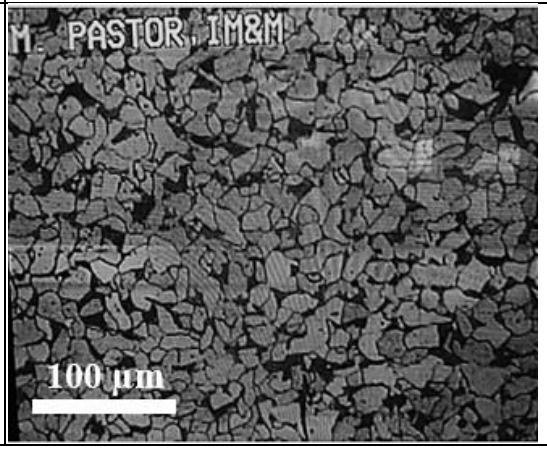
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 12-4: Micrografías de la probeta 1250-1

ZONA	100X	200X	500X
MATERIAL BASE			

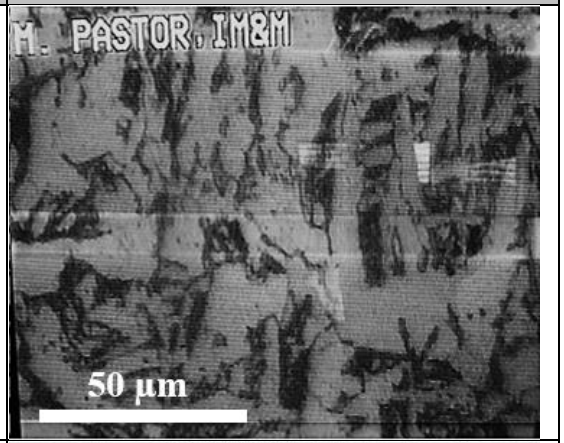
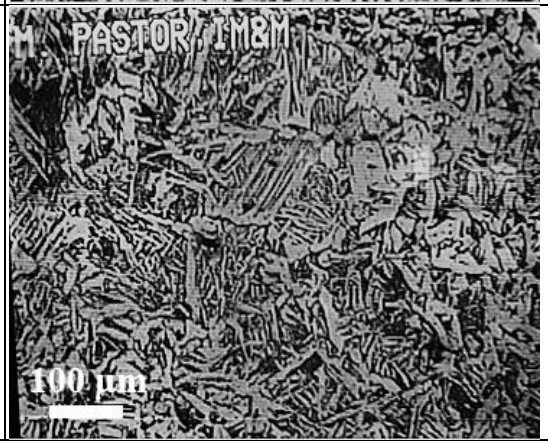
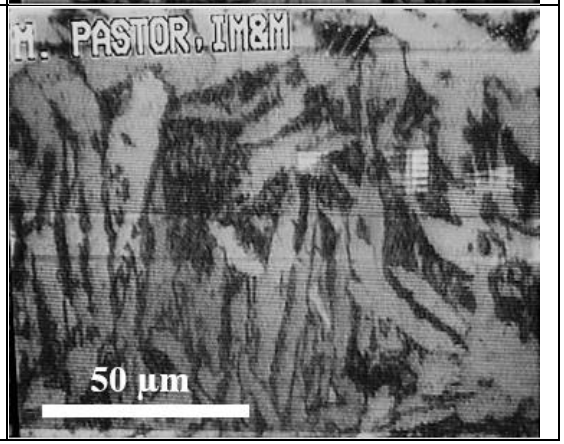
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 12-4: Micrografías de la probeta 1250-1 (Continuación)

ZONA	100X	200X	500X
ZONA DE TRANSICIÓN			
ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA			

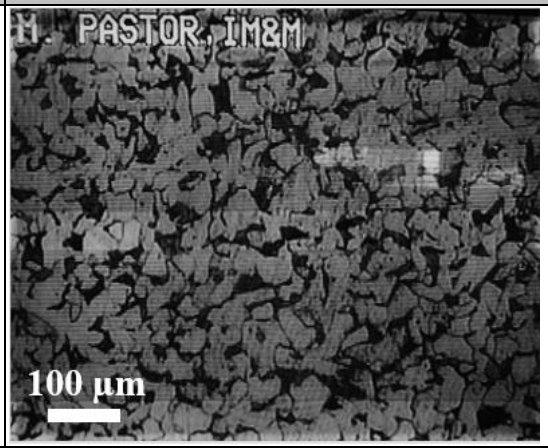
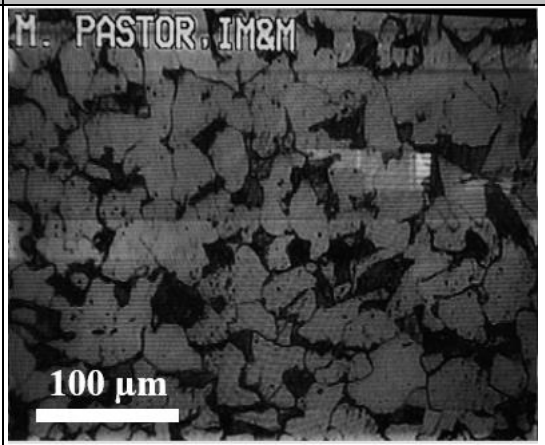
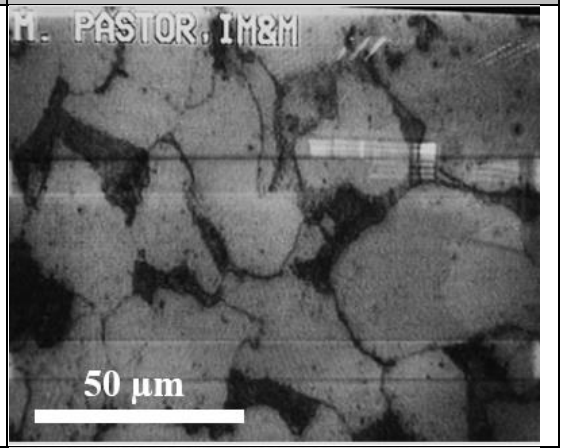
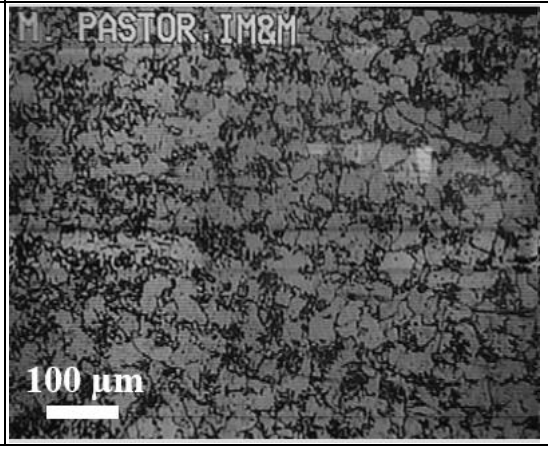
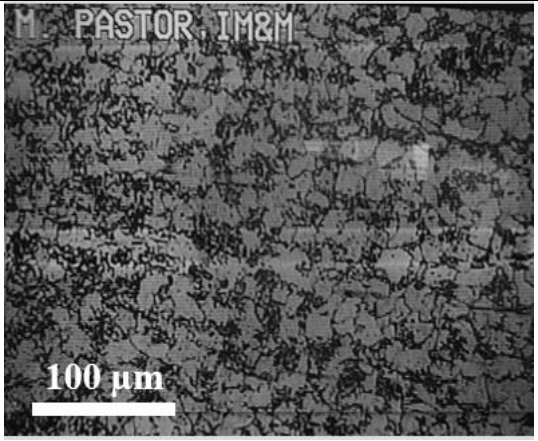
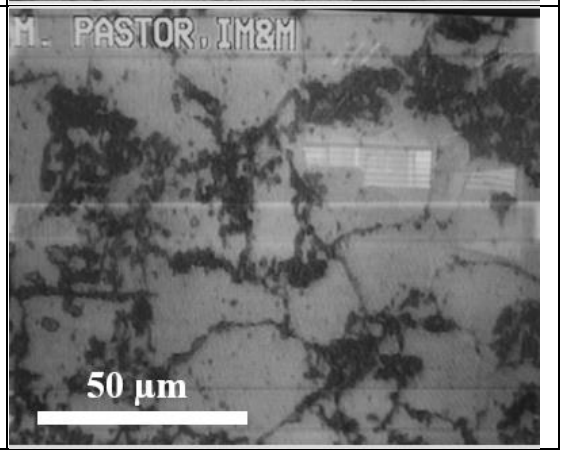
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 12-4: Micrografías de la probeta 1250-1 (Continuación)

ZONA	100X	200X	500X
ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA Y MECÁNICA			
ZONA DE MEZCLA			

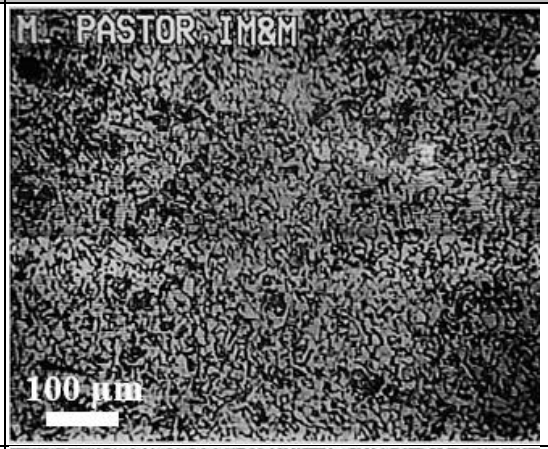
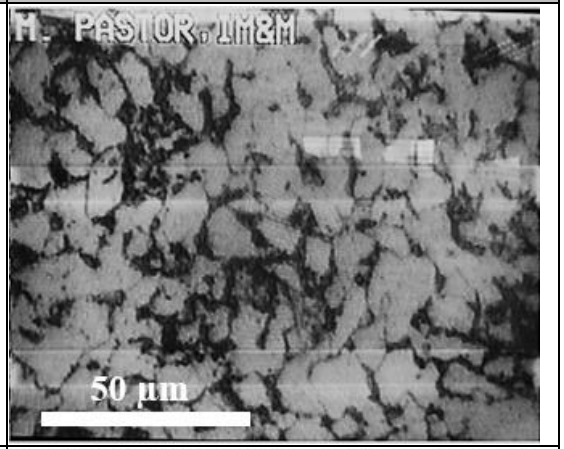
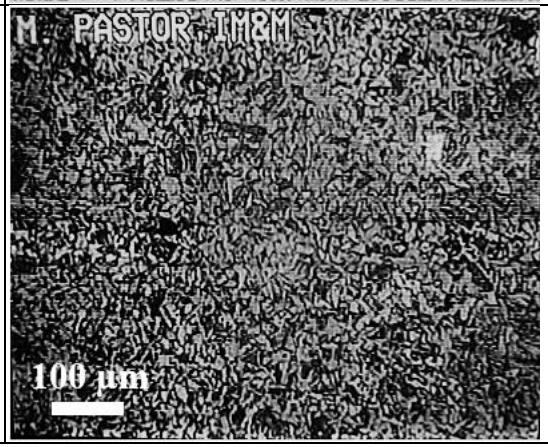
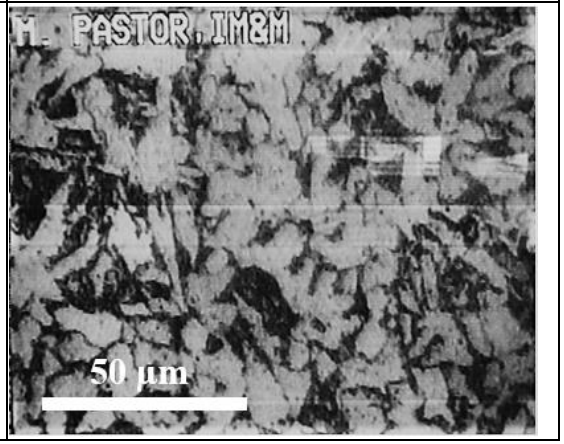
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 13-4: Micrografías de la probeta 1250-3

ZONA	100X	200X	500X
MATERIAL BASE			
ZONA DE TRANSICIÓN			

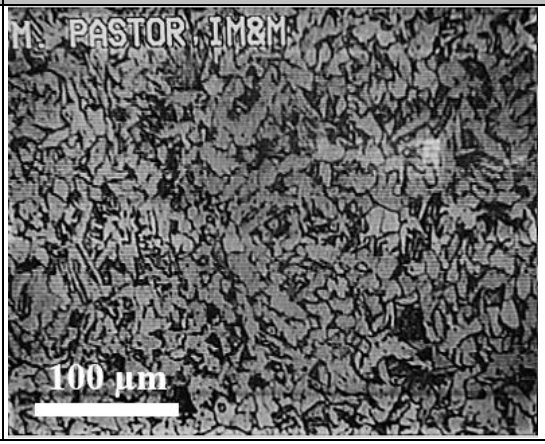
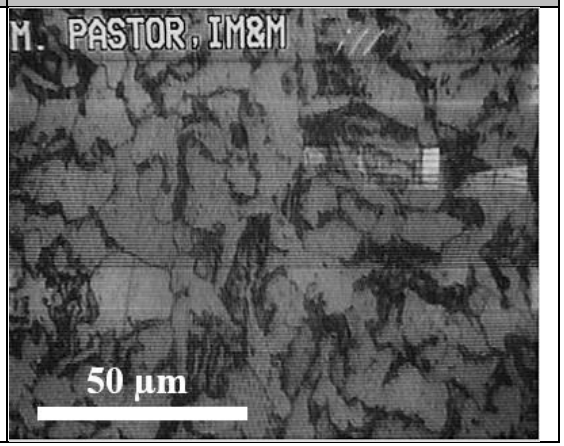
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 13-4: Micrografías de la probeta 1250-3 (Continuación)

ZONA	100X	200X	500X
ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA			
ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA Y MECÁNICA			

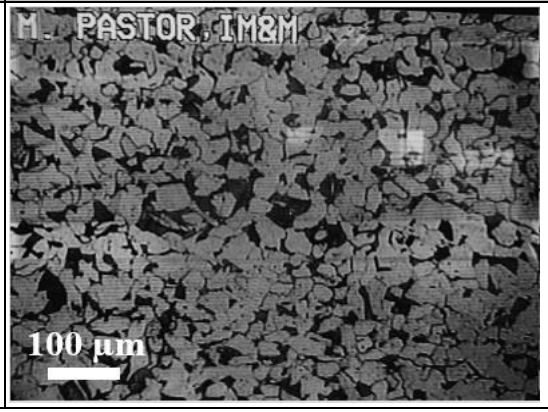
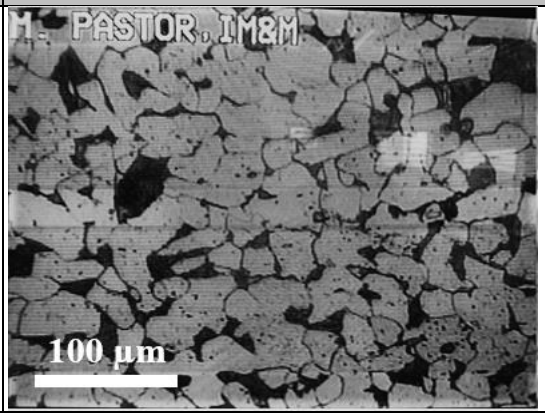
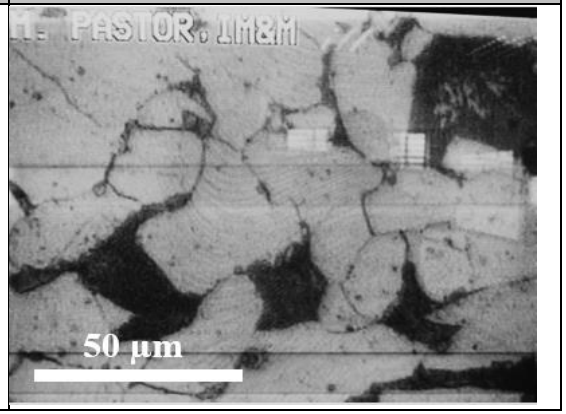
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 13-4: Micrografías de la probeta 1250-3 (Continuación)

ZONA	100X	200X	500X
ZONA DE MEZCLA			

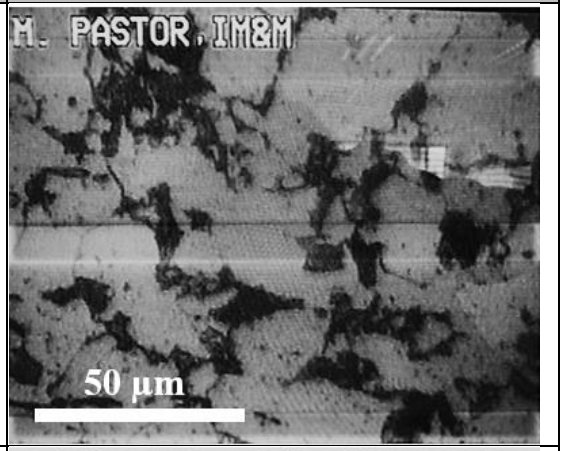
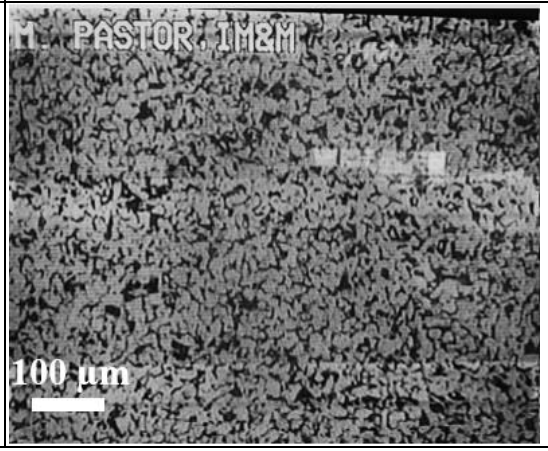
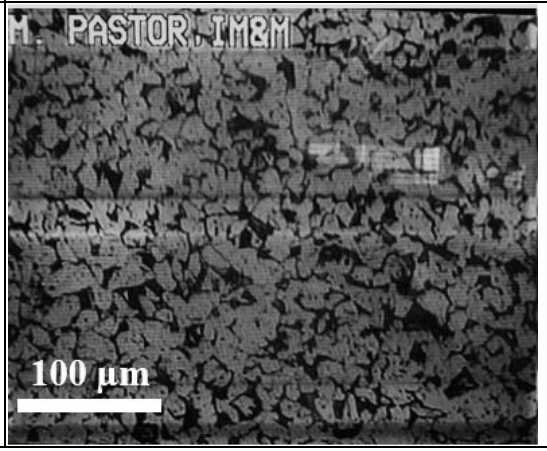
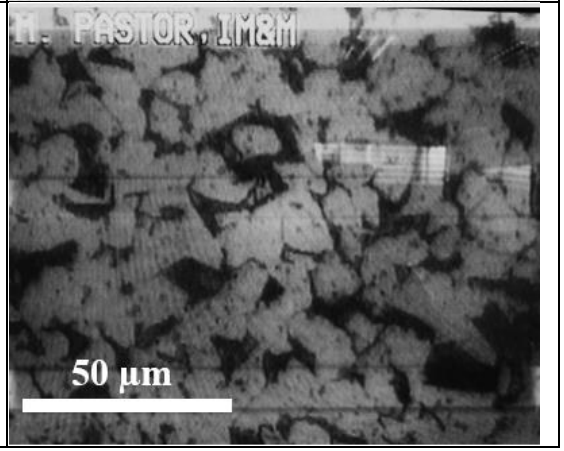
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 14-4: Micrografías de la probeta 1250-4

ZONA	100X	200X	500X
MATERIAL BASE			

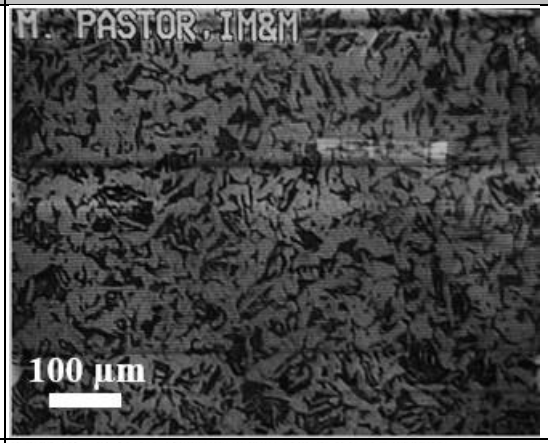
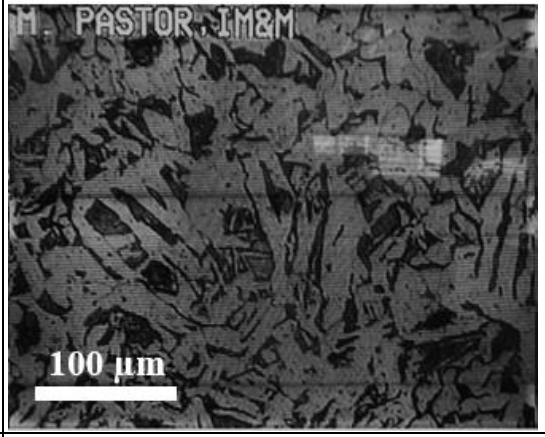
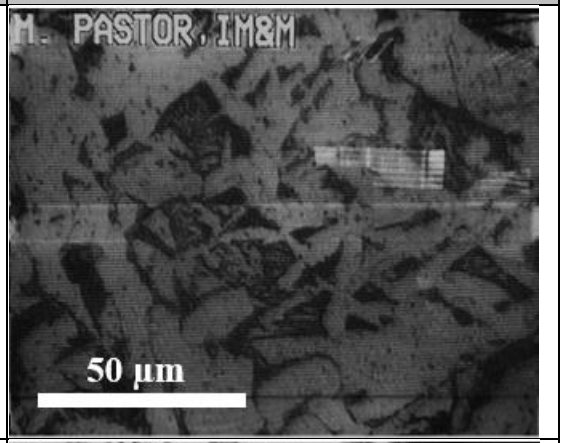
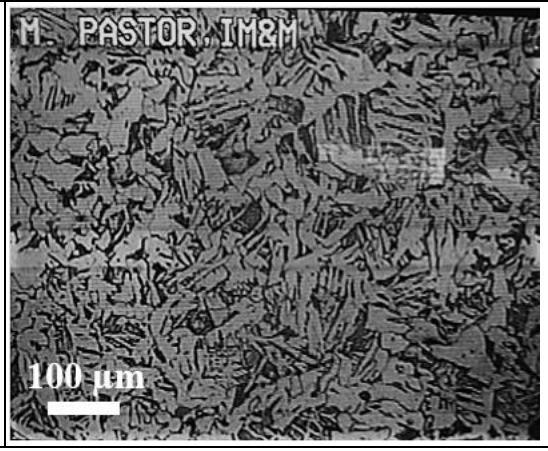
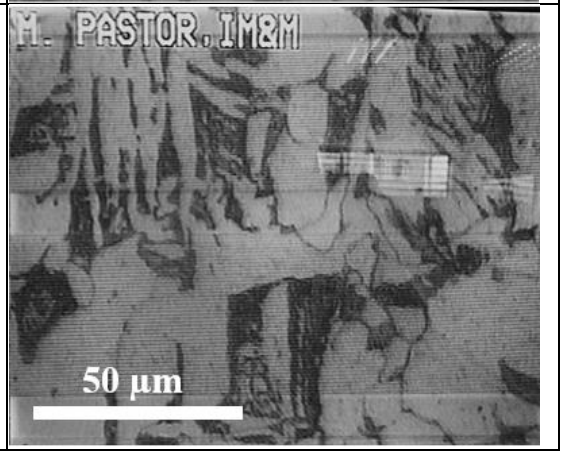
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 14-4: Micrografías de la probeta 1250-4 (Continuación)

ZONA	100X	200X	500X
ZONA DE TRANSICIÓN			
ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA			

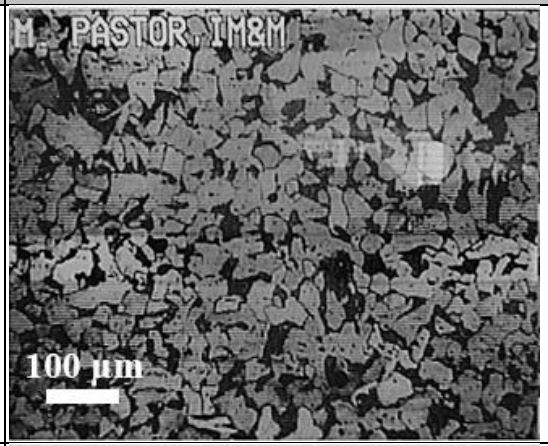
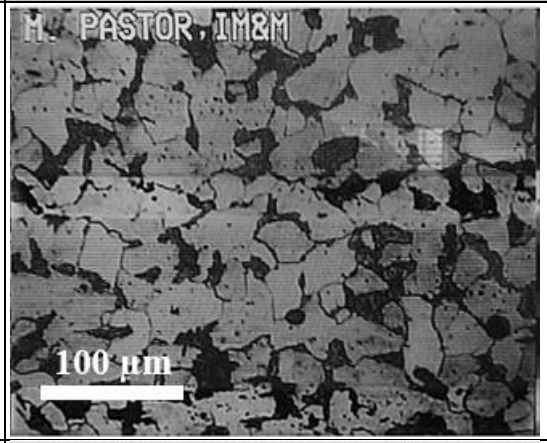
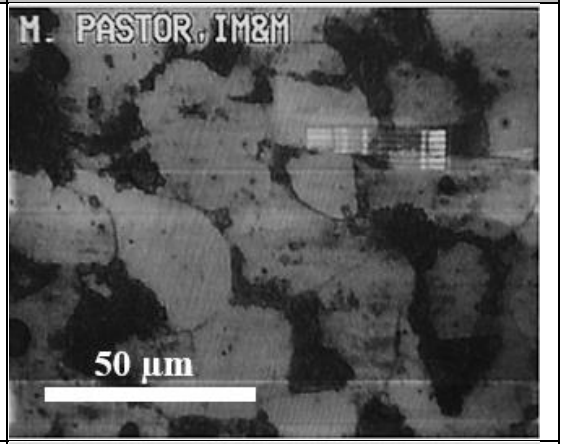
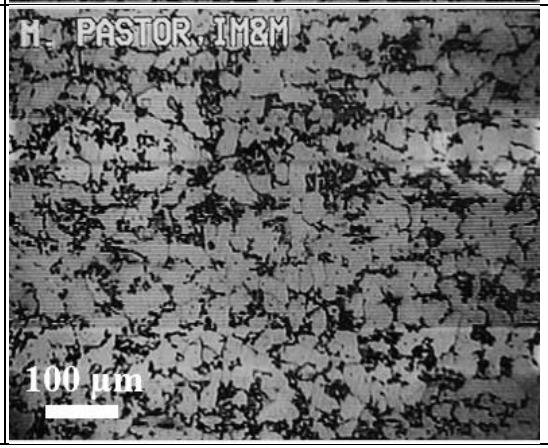
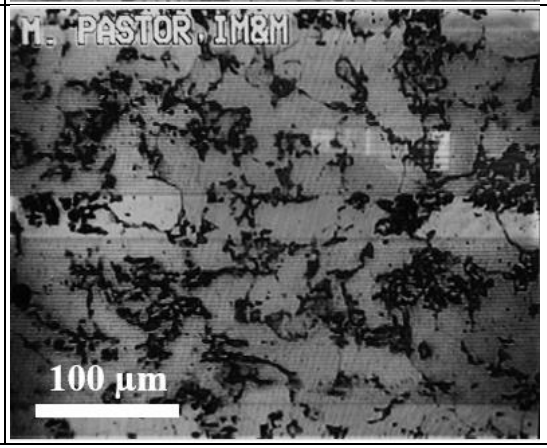
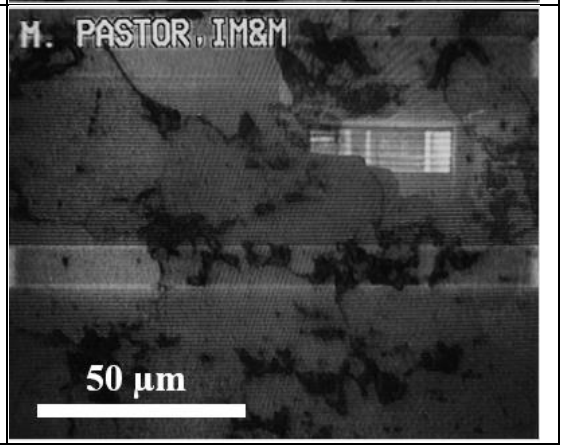
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 14-4: Micrografías de la probeta 1250-4 (Continuación)

ZONA	100X	200X	500X
ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA Y MECÁNICA			
ZONA DE MEZCLA			

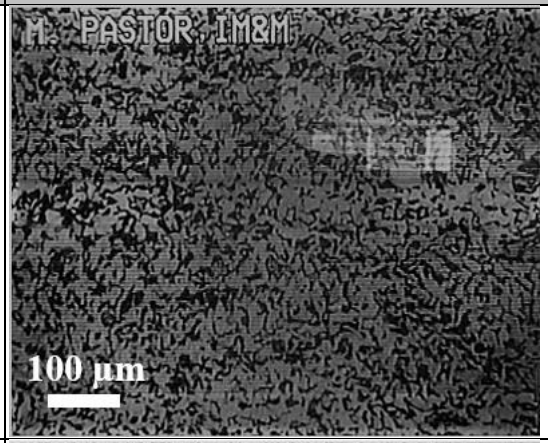
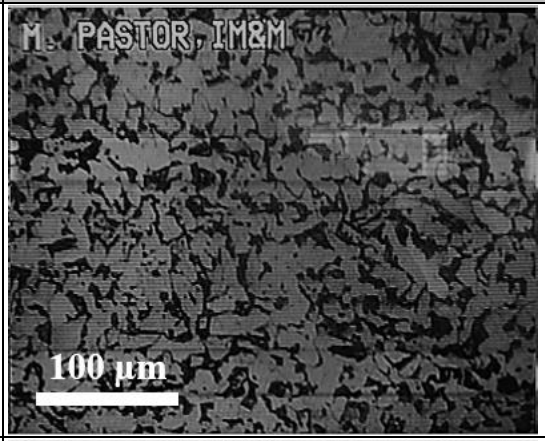
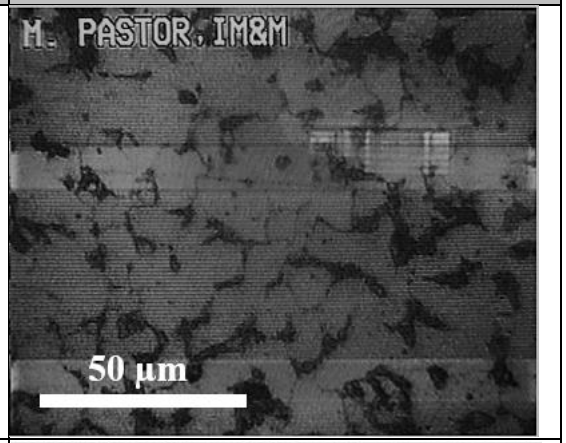
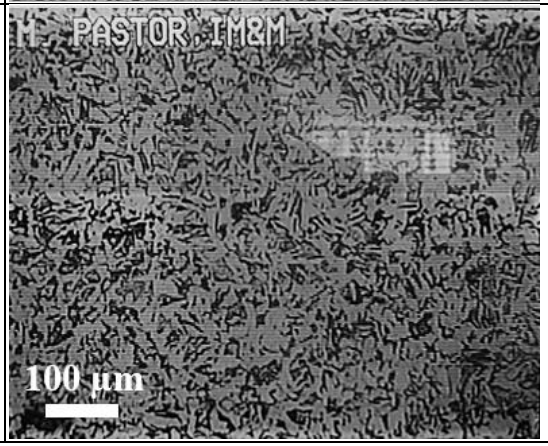
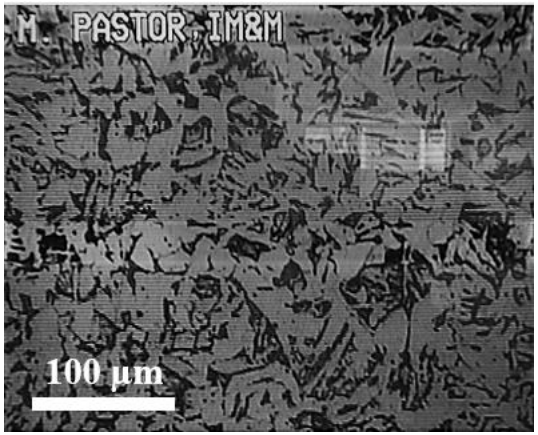
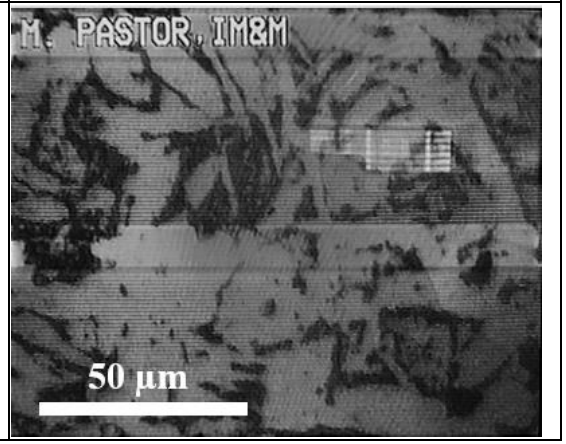
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 15-4: Micrografías de la probeta 1500-2

ZONA	100X	200X	500X
MATERIAL BASE			
ZONA DE TRANSICIÓN			

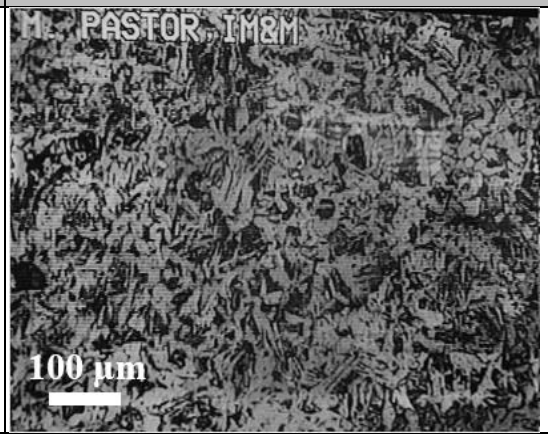
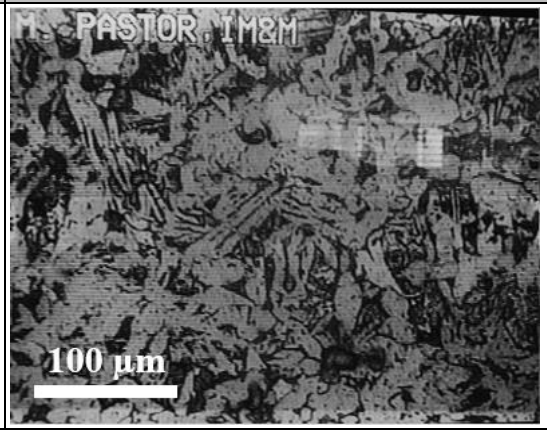
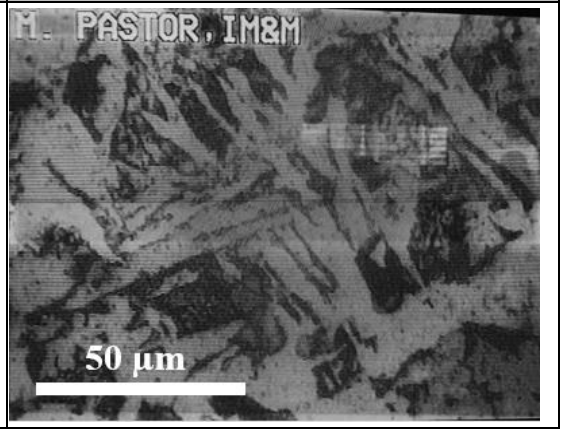
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 15-4: Micrografías de la probeta 1500-2 (Continuación)

ZONA	100X	200X	500X
ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA			
ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA Y MECÁNICA			

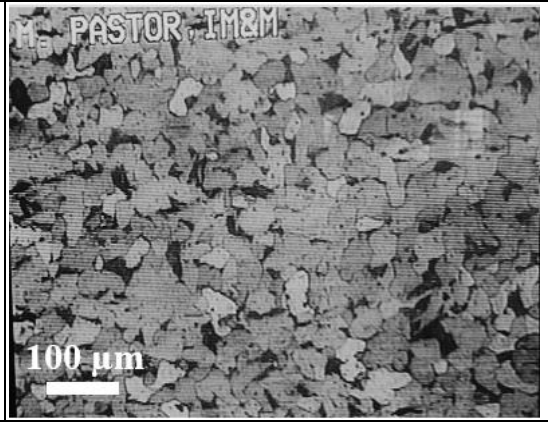
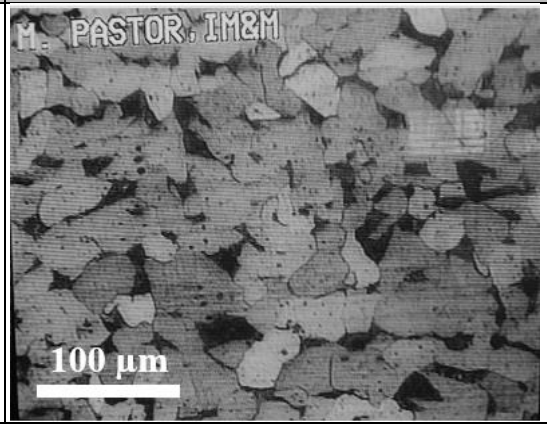
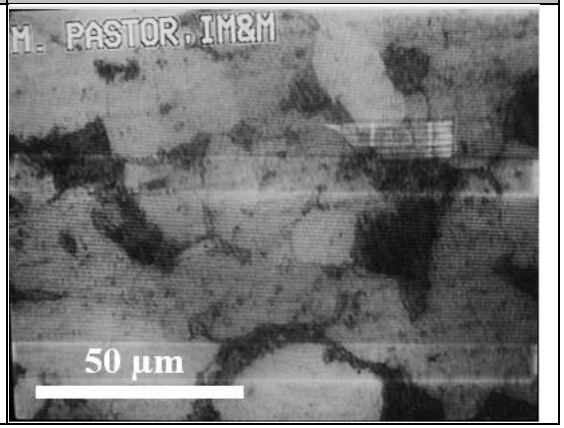
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 15-4: Micrografías de la probeta 1500-2 (Continuación)

ZONA	100X	200X	500X
ZONA DE MEZCLA			

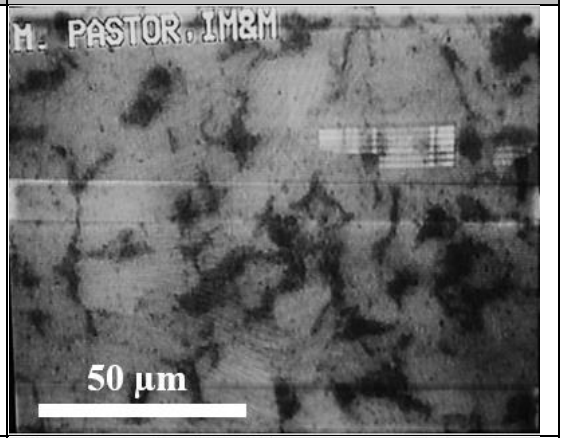
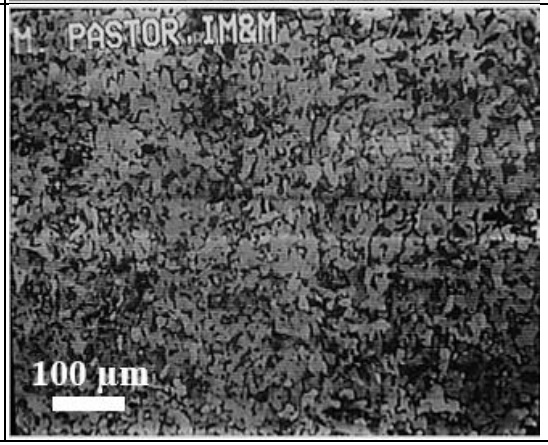
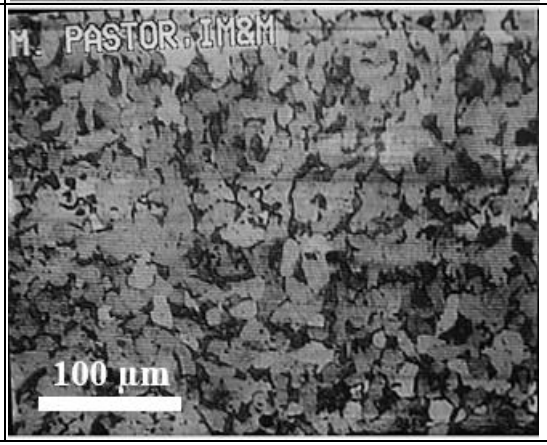
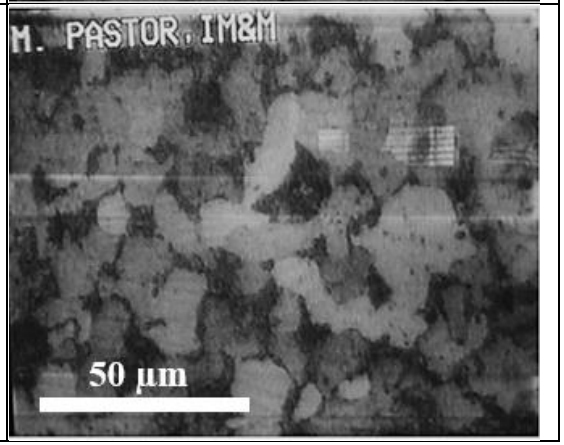
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 16-4: Micrografías de la probeta 1500-3

ZONA	100X	200X	500X
MATERIAL BASE			

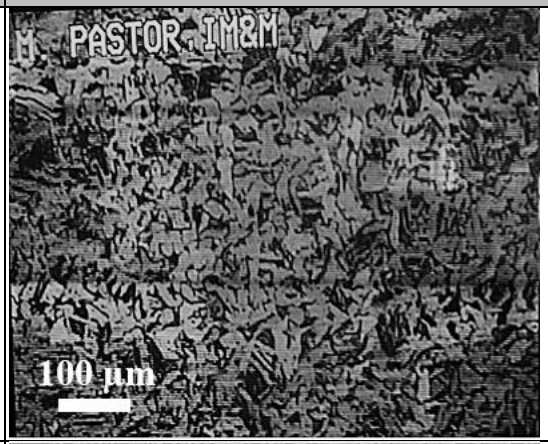
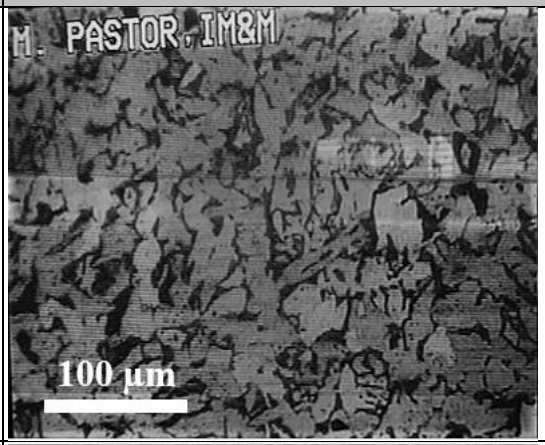
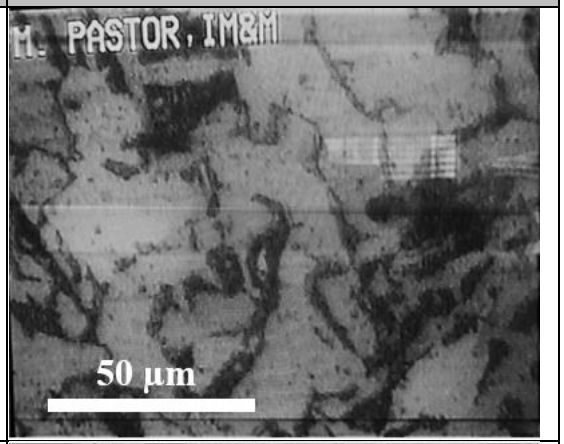
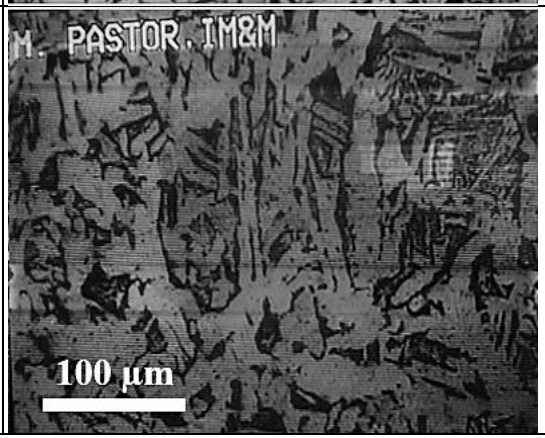
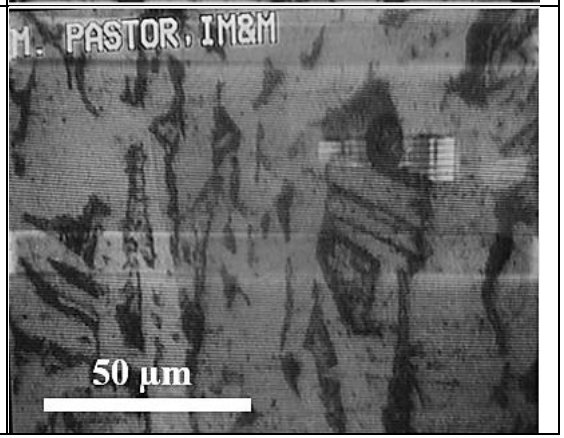
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 16-4: Micrografías de la probeta 1500-3 (Continuación)

ZONA	100X	200X	500X
ZONA DE TRANSICIÓN			
ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA			

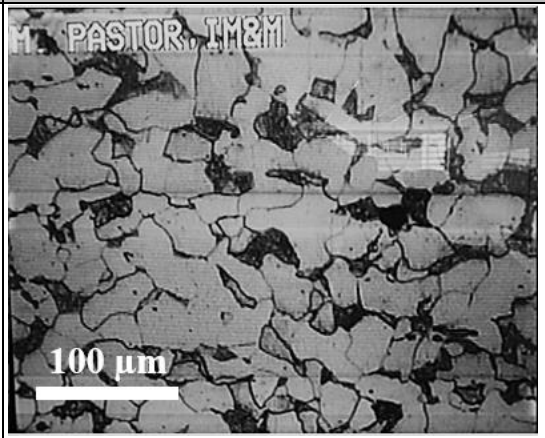
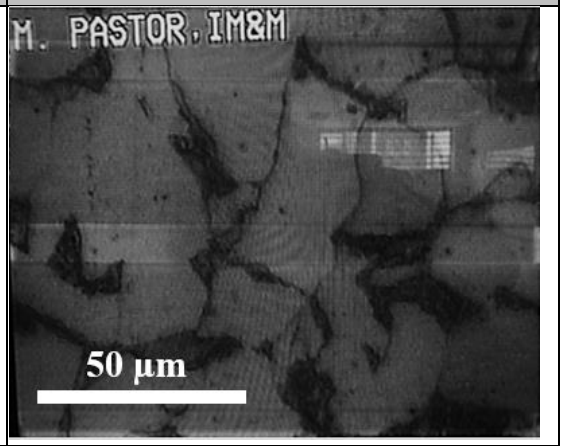
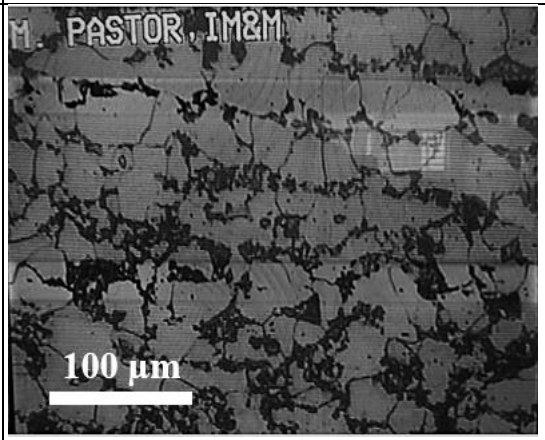
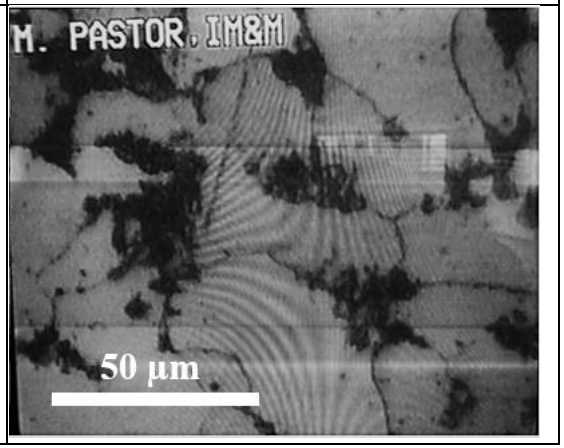
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 16-4: Micrografías de la probeta 1500-3 (Continuación)

ZONA	100X	200X	500X
ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA Y MECÁNICA			
ZONA DE MEZCLA			

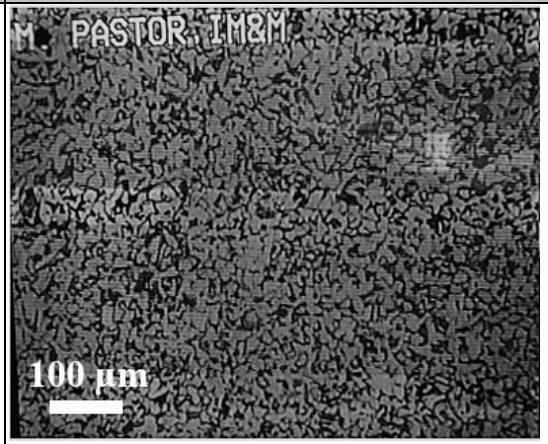
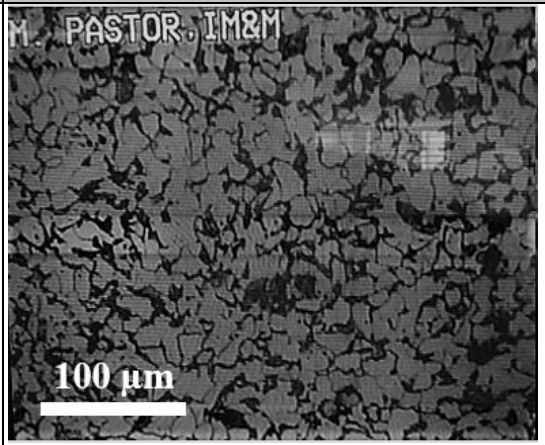
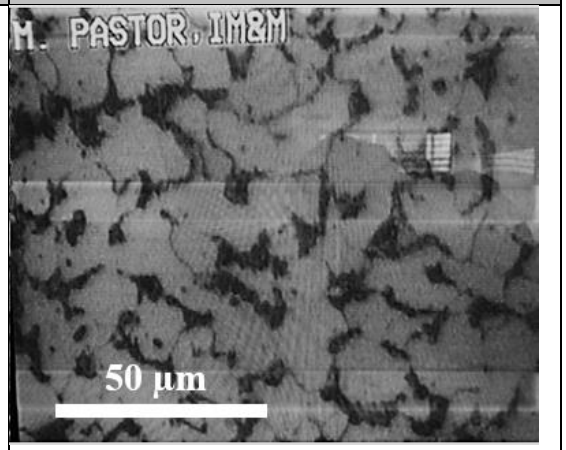
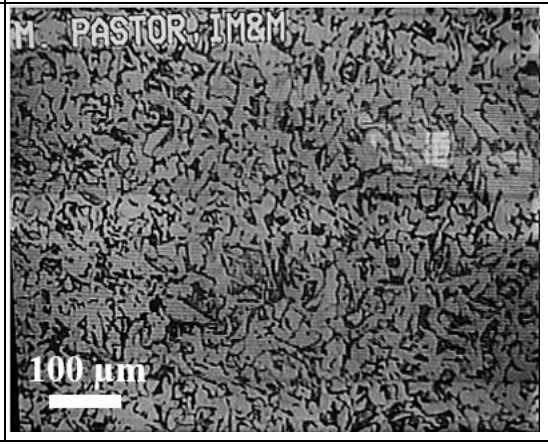
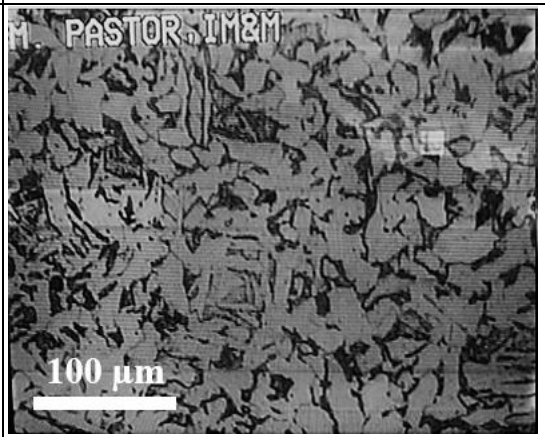
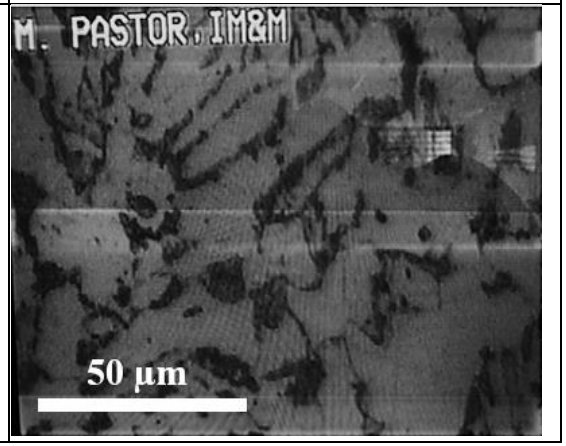
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 17-4: Micrografías de la probeta 1500-4

ZONA	100X	200X	500X
MATERIAL BASE			
ZONA DE TRANSICIÓN			

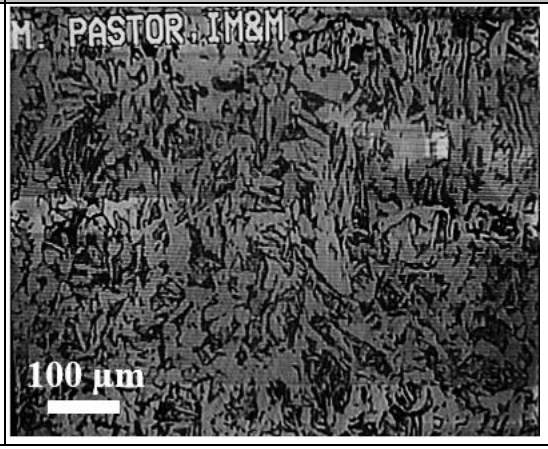
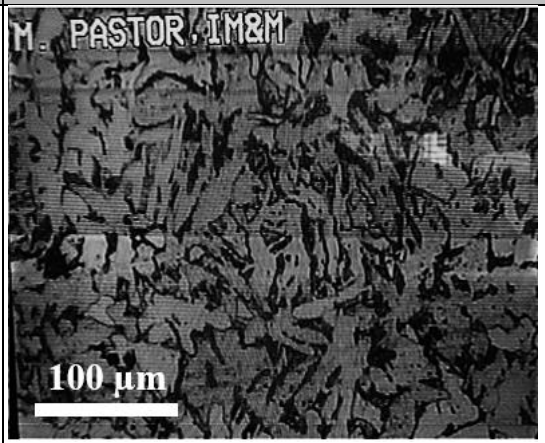
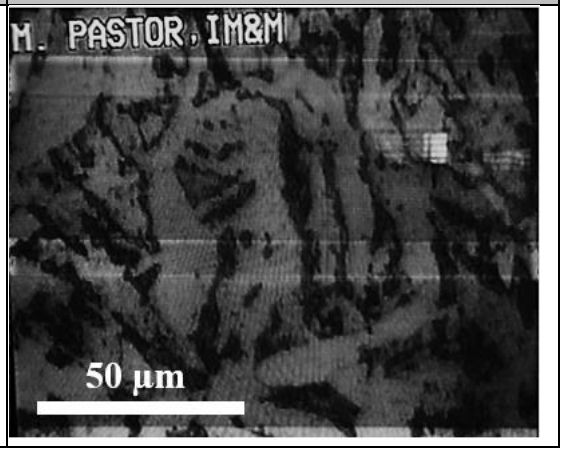
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 17-4: Micrografías de la probeta 1500-4 (Continuación)

ZONA	100X	200X	500X
ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA			
ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA Y MECÁNICA			

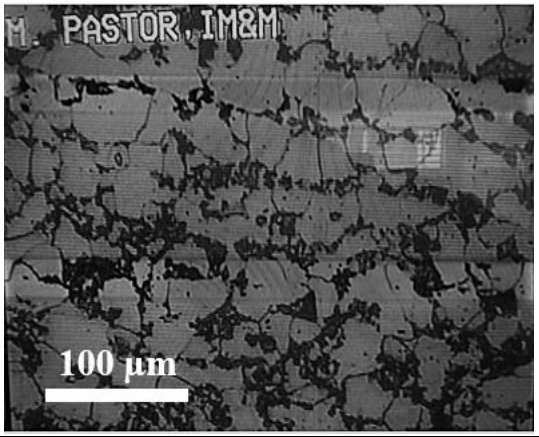
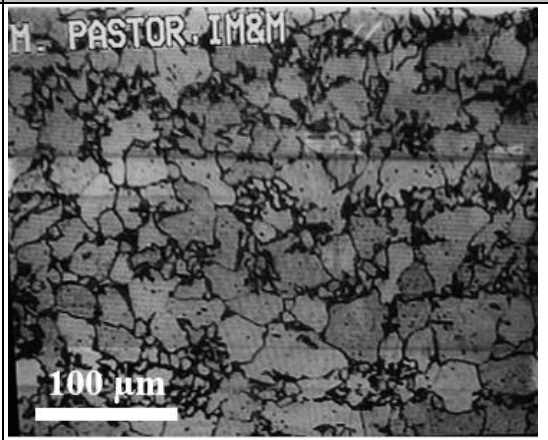
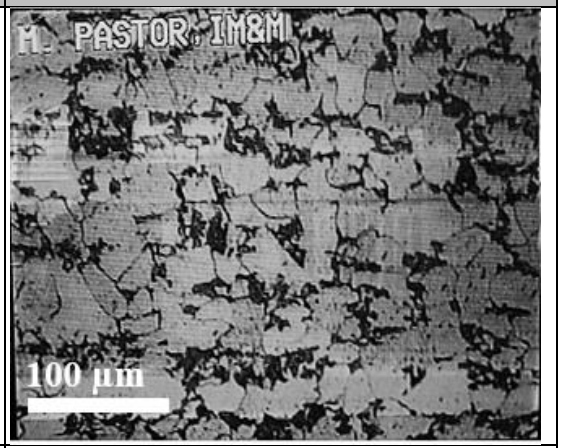
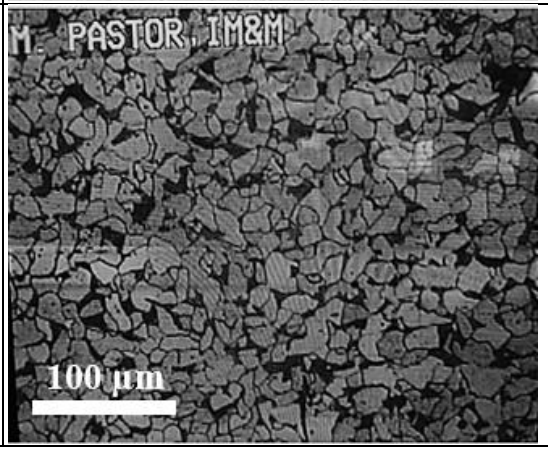
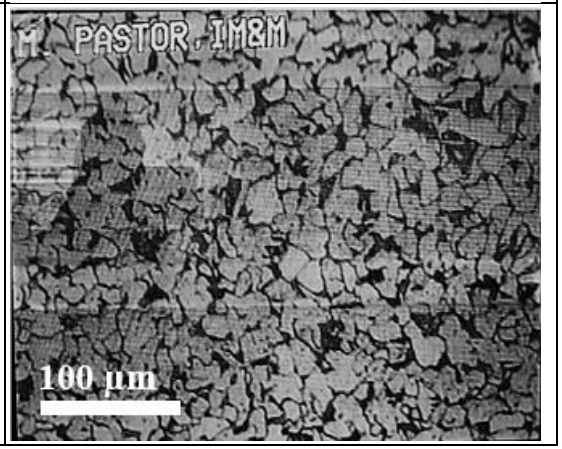
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 17-4: Micrografías de la probeta 1500-4 (Continuación)

ZONA	100X	200X	500X
ZONA DE MEZCLA			

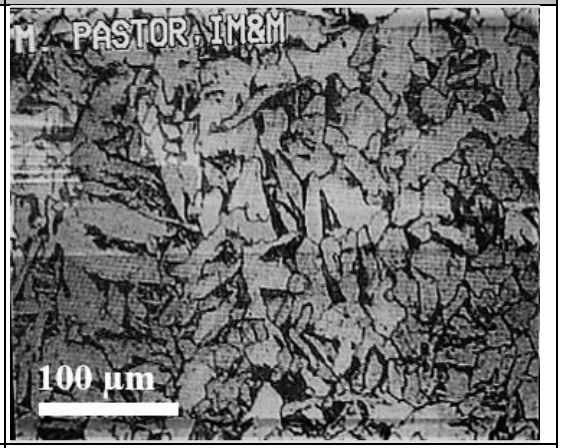
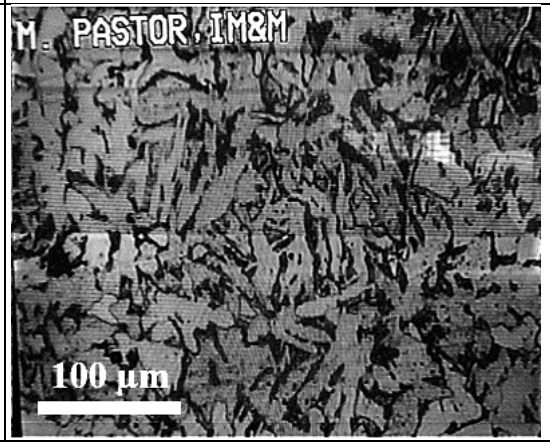
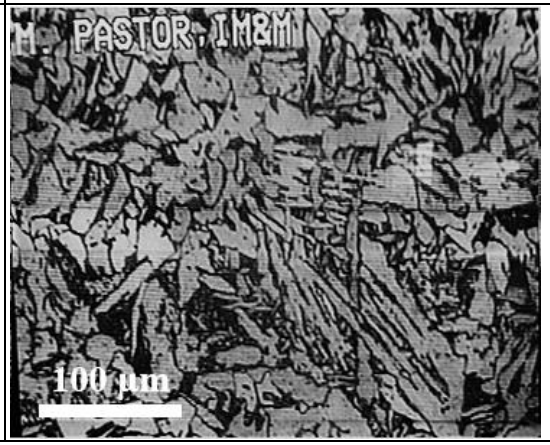
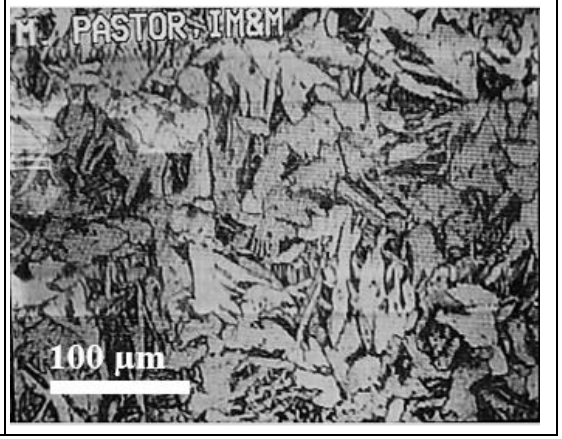
Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 18-4: Tabla comparativa, zona de afectación térmica respecto a la velocidad de ensayo

ZONA	1500 RPM	1250 RPM	1000 RPM
	1500-4	1250-1	1000-5
ZONA DE TRANSICIÓN			
ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA			

Realizado por: Huaraca A, 2021

Tabla 18-4: Tabla comparativa, zona de afectación térmica respecto a la velocidad de ensayo (Continuación)

ZONA	1500 RPM	1250 RPM	1000 RPM
	1500-4	1250-1	1000-5
ZONA DE AFECTACIÓN TÉRMICA Y MECÁNICA			
ZONA DE MEZCLA			

Realizado por: Huaraca A, 2021

4.3. Dureza Vickers

4.3.1. Cálculo de la dureza

Para calcular la dureza se aplica la ecuación (1) que se presenta en la norma correspondiente.

$$HV = \frac{0{,}189gP}{(d_{prom})^2} \quad (1)$$

Donde:

g: gravedad en m/s^2

P: carga en kg

d_{prom}: longitud promedio de las diagonales del identador en mm

La longitud de las diagonales de todas las identaciones realizadas se presenta en el anexo A.

4.3.2. Perfil de dureza

El perfil de dureza se construye con los valores calculados en cada una de las zonas de afectación térmica determinados, tanto del lado izquierdo como del lado derecho de la zona de fusión que corresponde al valor HV5, HV4 y HV6 corresponden a la zona ZMTA, HV3 y HV7 corresponden a la zona ZMT, HV2 y HV8 corresponden a la zona de transición y HV1 y HV9 corresponde a la dureza calculada en el metal base. En la tabla 19-4 se muestra el resumen dichas medidas.

Tabla 19-4: Microdureza Vickers

VELOCIDAD RPM	DENOMINACIÓN	MICRODUREZA								
		HV1	HV2	HV3	HV4	HV5	HV6	HV7	HV8	HV9
1000	1000-2	127	130	135	154	181	159	138	125	112
	1000-3	110	130	132	150	181	148	138	130	123
	1000-5	110	125	140	144	196	148	141	138	124
1250	1250-1	125	135	138	154	170	147	137	130	123
	1250-3	118	132	137	143	151	143	136	127	125
	1250-4	130	130	137	144	170	154	140	131	130
1500	1500-2	136	140	141	164	175	153	144	132	130
	1500-3	136	140	150	164	166	156	144	131	128
	1500-4	138	143	147	171	183	156	136	118	113

Realizado por: Huaraca A, 2021

Los valores de dureza de la tabla 9-4 se representan en los gráficos 1-4, gráficos 2-4 y gráficos 3-4 agrupados según la velocidad de ensayo. En las 3 gráficas se observa que los valores de dureza generan una curva tipo campana donde la dureza aumenta a medida que se acerca a la zona de fusión y es ahí donde se registra su valor máximo. En la gráfica 1-4 y gráfica 2-4, se observa el

perfil de dureza que presentan las probetas ensayadas a una velocidad de 1000RPM y 1250RPM respectivamente. En ambos casos, existe una pequeña dispersión en los valores registrados. Para la gráfica 1500RPM se observa una situación diferente, la dispersión es mucho más evidente, haciéndose más visible en la zona ZTMA que rodea a la zona de fusión creando curvas asimétricas.

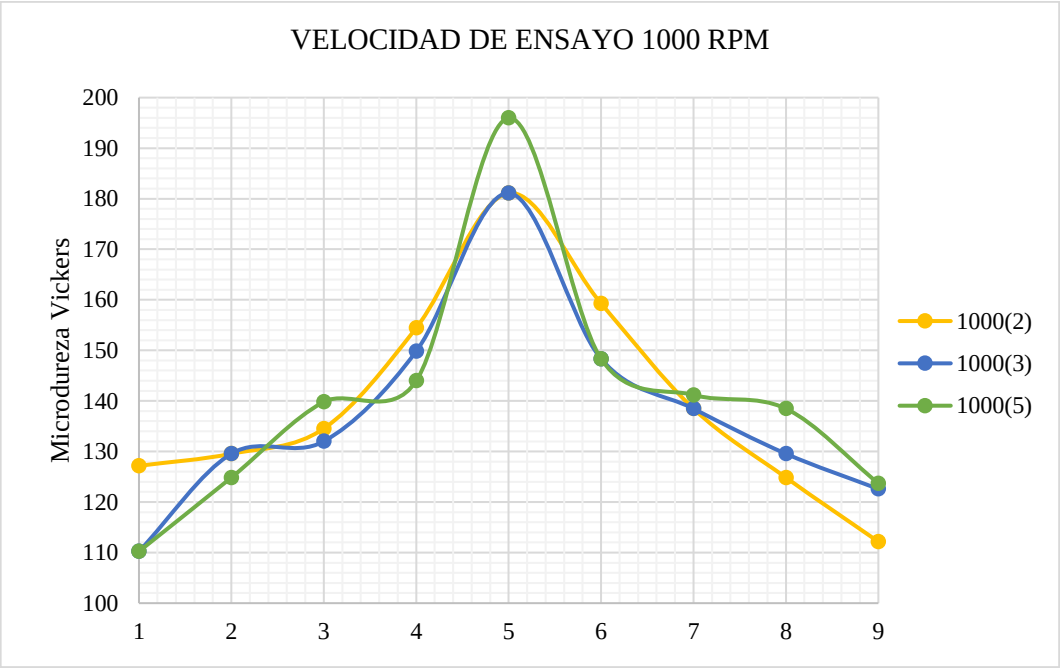


Gráfico 1-4: Perfil de dureza para una velocidad de ensayo de 1000 RPM.

Realizado por: Huaraca A, 2021.

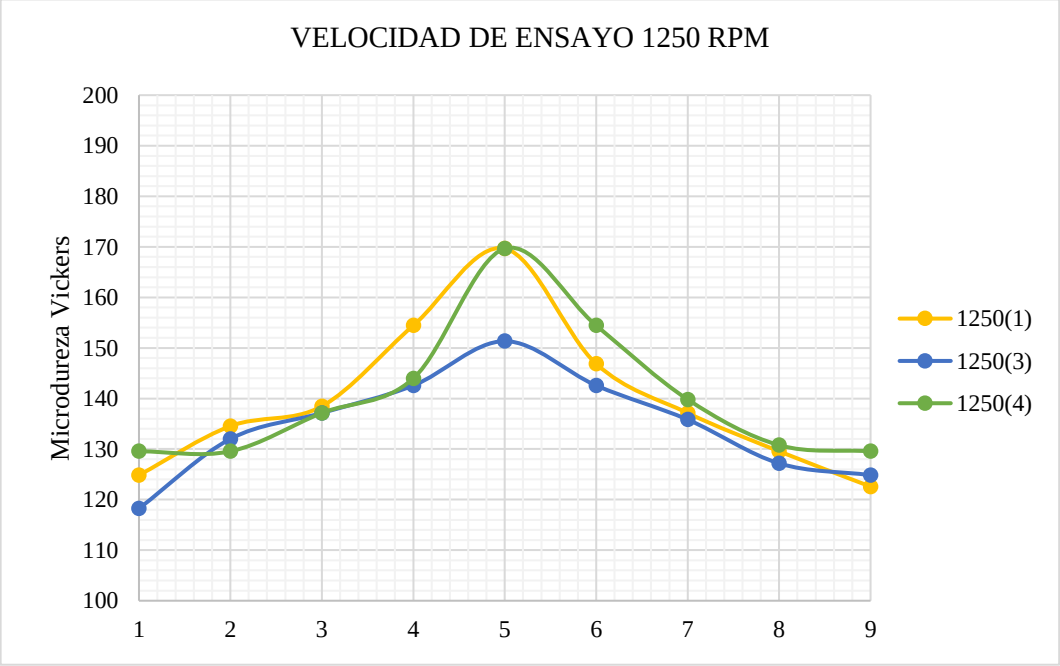


Gráfico 2-4: Perfil de dureza para una velocidad de ensayo de 1250 RPM.

Realizado por: Huaraca A, 2021.

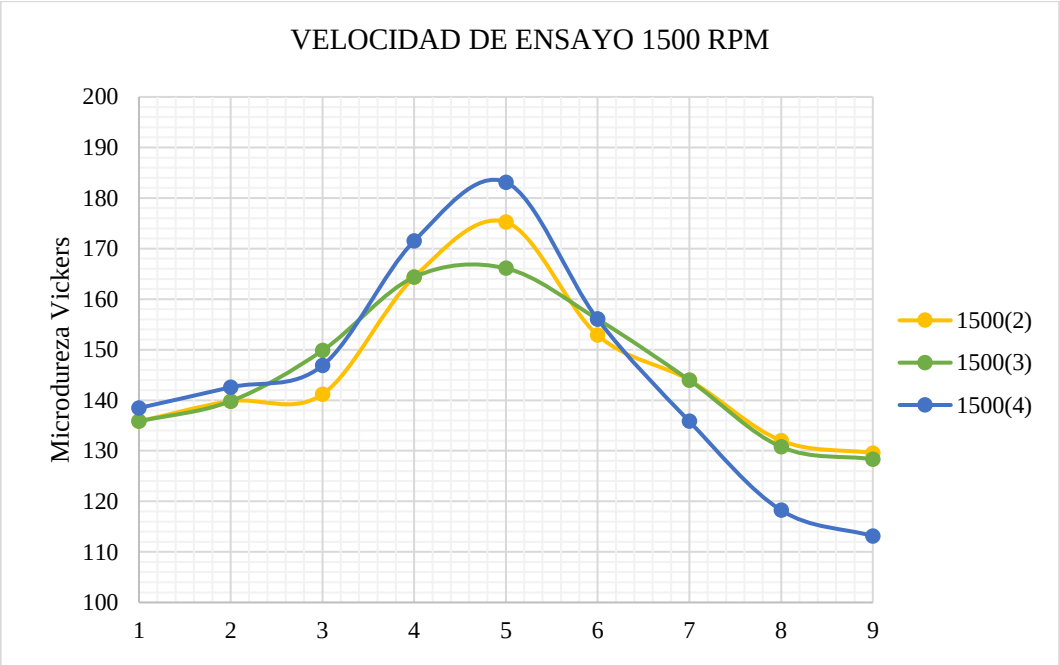


Gráfico 3-4: Perfil de dureza para una velocidad de ensayo de 1500 RPM.

Realizado por: Huaraca A, 2021.

4.3.3. Perfil de dureza promedio

Al observar un comportamiento diferente para cada velocidad de ensayo, se requiere una gráfica comparativa entre las velocidades de ensayo, para esto se calcula una dureza media en cada uno de los puntos los que se presentan en la tabla 20-4 y se presentan en la gráfica 4-4. En la gráfica 4-4 se observa que el perfil de dureza promedio de la probeta ensayada a 1500RPM presenta una mayor dispersión en el lado izquierdo respecto a su lado derecho y a los otros dos perfiles. El perfil de dureza en el que se observa el punto máximo de la gráfica es el perfil del ensayo realizado a 1000RPM, donde se obtiene 186HV. El segundo valor máximo registrado es el del ensayo a 1500RPM con una dureza de 175HV y en tercer lugar se tiene al ensayo de 1250RPM con 163HV. A pesar de que a una velocidad de ensayo de 1500RPM se obtiene un alto nivel de dureza en la zona de fusión, se muestra como una curva inestable.

Tabla 20-4: Microdureza Vickers promedio

VELOCIDAD DE ENSAYO	MICRODUREZA PROMEDIO								
	HV1	HV2	HV3	HV4	HV5	HV6	HV7	HV8	HV9
1000	115	128	135	149	186	152	139	131	119
1250	124	132	138	147	163	148	138	129	126
1500	137	141	146	167	175	155	141	127	123

Realizado por: Huaraca A, 2021.

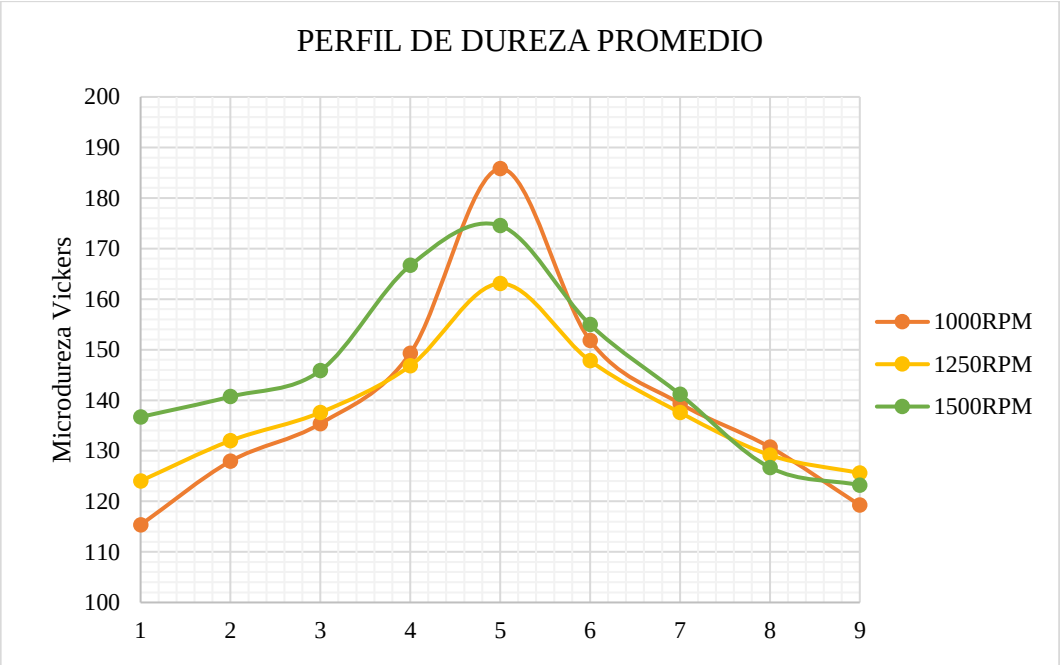


Gráfico 4-4: Perfil de dureza promedio según la velocidad de ensayo.

Realizado por: Huaraca A, 2021

CONCLUSIONES

La AWS en su Handbook de soldadura, determina que los principales parámetros de control para el proceso de soldadura por fricción son: la velocidad relativa que las superficies adquieren, la presión que se ejerce entre las caras durante la fase de fricción, la temperatura de plastificación del material, las propiedades que tiene el material adquirido comercialmente, el estado de las superficies y dimensiones de la muestras, además de la presencia de películas superficiales que recubren a las probetas, entre otras más.

Previo a realizar el proceso de soldadura se realiza el mecanizado tanto de la superficie de contacto como de la periferia para controla la presencia de agentes contaminantes que comprometan la calidad final de la soldadura. Las temperaturas registradas con ayuda del pirómetro digital, superaron los 1000°C durante la fase de calentamiento y plastificación del material. En cuanto a la velocidad se observan escenarios particulares donde a medida que la velocidad aumenta el avance axial se generaba más rápido y con menor presión, así para los ensayos a una velocidad de 1000 rpm el tiempo en que se recorren 8mm es de 22,4 segundo, para 1250 rpm el tiempo es de 21,2 segundos y finalmente para 1500 rpm el tiempo empleado es de 20,6mm. De igual manera se observa que si el avance es uniforme la rebaba de material expelido a la periferia es regular, caso contrario se observan zonas puntuales de concentración de material.

Al realizar el ataque químico en la superficie pulida, se observan varios cambios de coloración en la misma revelando las diferentes zonas de afectación térmica. En la zona de fusión donde el material se mezcló se presenta una franja vertical homogénea delgada y brillante que corresponde a la ZM, alrededor de esta se observan dos franjas homogéneas, una a cada lado de la zona de mezclado, un poco más oscuras y considerablemente más ancha que la primera y que corresponde a la zona de afectación térmica ZAT. De igual manera junto a estas se muestran dos zona irregulares y difuminadas propias de la zona de transición entre el material base y la zona ZAT, finalmente se observa el material base con una coloración solida pero más clara que la zona ZAT. Entre la zona ZAT y la zona ZM no se puede observar un cambio de coloración que identifique a la zona ZTMA, pero es posible reconocerla porque existe un ensanchamiento en la periferia de la probeta. Con el análisis micrográfico se puede apreciar de mejor manera estás zonas en el material, donde es posible observar el cambio de microestructura que presenta el material.

Cada zona determinada en el material presenta una microestructura particular y una dureza específica, con las cuales se construye el perfil de dureza para cada una de las velocidades de ensayo. El perfil de dureza se trata de una curva tipo campana con una distribución normal donde el punto máximo se encuentra en la zona de mezclado en la que se observó una microestructura ferrítica tipo Widmanstatten resultado de las altas temperaturas a las que fue sometido el material, en este caso por encima de los 1000°C. Aunque la zona ZMTA también presenta ferrita

Widmanstatten su dureza es menor, mientras que para las demás zonas se pudo identificar una estructura con presencia de perlita y ferrita de grano pequeño para la ZTA y de grano grande para la MB.

Para determinar el comportamiento que presentan las probetas ensayadas a diferentes velocidades, fue necesario obtener una curva promedio para cada velocidad, estas curvas se agrupan en una nueva gráfica para su comparación. Gracias a esta comparación se determina que la velocidad de ensayo más adecuada para barra de acero estructural ASTM A36 de 14mm de diámetro es 1000RPM y un tiempo de fricción de 20s ya que además de obtener la mayor dureza, el perfil de dureza se muestra como una curva suavizada, visualmente también se observa que las zonas de afectación térmica tienen la misma longitud tanto a la derecha como izquierda de la ZM.

RECOMENDACIONES

Para evitar problemas de excentricidades en la soldadura y vibraciones por pandeo excesivas, se recomienda que el proceso de soldadura se realice en un equipo cuyo sistema de sujeción de la probeta estática sea similar al sistema de sujeción de la probeta móvil donde la distancia en voladizo del material no sea mayor a 70mm. De igual manera se recomienda que el avance del cabezal móvil sea de forma automática.

Se recomienda involucrar otros parámetros de control de la soldadura como es la temperatura, creando un perfil de temperatura en cada uno de los ensayos. Si la temperatura registrada incrementa de tal manera que llega a una temperatura cercana a la temperatura de fusión, utilizar algún sistema de lubricación. De igual manera se recomienda realizar ensayos a velocidades más bajas que las de esta investigación para determinar el comportamiento de la junta.

Si se retoma la investigación se recomienda realizar ensayos con diámetros de barras mayores y experimentar juntas con otros materiales y juntas entre materiales disimiles.

BIBLIOGRAFÍA

AMAGUAYO PUGLLA, Byron Jose, & SÁNCHEZ CALERO, Oscar Vinicio. "Estudio y caracterización del comportamiento micro-estructural de la soldadura por fricción en materiales disímiles Cobre Electrolítico- Aluminio (AA-6063)". *Escuela Politécnica Nacional.* [En línea], 2017, (Ecuador). [Consulta: 19 junio 2021].:. Disponible en: http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17187.

AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). *Welding Handbook*. En su Welding processes, part 2. Vol 3. 9ª ed. USA:2015. ISBN 9780871710536.

ANGAMARCA PUPIALES, Andrés Paúl, & GARCÍA CLAUDIO, Bryan Steven. "Estudio y caracterización de la soldabilidad en materiales disímiles Aluminio (6061) – Latón (C38500) mediante el proceso de soldadura por fricción". *Escuela Politécnica Nacional.* [En línea], 2018, (Ecuador). [Consulta: 19 junio 2021]. Disponible en: https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19425/1/CD-8815.pdf.

ASTM. *Standard specification for carbon structural steel*. A 36/A 36M-05, 2019. Vol. 14, pp. 1-4. DOI 10.1520/A0036. 2019.

ASTM. *Standard practice for preparation of metallographic specimens*. E3-95, 2016. Vol. 82, pp. 1-15. ISSN 21653992.

ASTM. *Standard test method for microindentation hardness of materials*. E384-17, 2005. Vol. 14, pp. 1-24. DOI: 10.1520/E0384-17

ASTM. *Standard test method for Brinell hardness of metallic materials*. E10 - 18, 2018, Vol 15, pp. 1-36. DOI: 10.1520/E0010-18.

ASTM. *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*. E18 − 16, 2016. Vol 16, pp. 1-38. DOI 10.1520/E0018-15.2.

AWS. *About AWS: American Welding Society*. [En línea]. USA: AWS, 2020 [Consulta: 19 junio 2021]. Disponible en: https://www.aws.org/about/page/home.

BUENO ZABALO, Roke. "Soldadura por fricción rotativa en GKN Driveline Zumaia" *Escuela Politécnica de San Sebastián.* [En línea], 2015, (España). [Consulta: 19 junio 2021].:. Disponible en: http://hdl.handle.net/10810/15414.

CÁRDENAS, Pedro Daniel. "Comportamiento termomecánico de una funda para eje motriz durante el proceso de soldadura por fricción rotativa directa" *Universidad Autónoma de Nuevo León.* [En línea], 2015, (México). [Consulta: 25 mayo 2021]. Disponible en: http://eprints.uanl.mx/id/eprint/11303.

CASTRO LISINTUÑA, Carmen. "Caracterización de las probetas soldadas por fricción mediante pruebas de tracción y torsión para materiales: Acero AISI 1018, Acero AISI 1045, Aluminio y Bronce SAE 40 de 10mm de diámetro" *Universidad Politécnica Salesiana.* [En

línea], 2018, (Ecuador). [Consulta: 26 mayo 2021]. Disponible en: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15220.

CHÁVEZ SARANGO, Jaime Oswaldo. "Estudio de la soldabilidad entre un acero inoxidable y un acero al carbono mediante el proceso de soldadura por fricción". *Escuela Politécnica Nacional*. [En línea], 2017, (Ecuador). [Consulta: 26 mayo 2021]. Disponible en: http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17527.

DIPAC. *Varilla lisa*. [En línea]. Ecuador: DIPAC productos de acero. 2021 [Consulta: 18 julio 2021]. Disponible en: https://www.dipacmanta.com/varilla-redonda

FEDERACIÓN DE ENSEÑANZA DE CC.OO. DE ANDALUCÍA. *Ensayos destructivos metalúrgicos*. *Primera parte*. Revista temas para la educación. [En línea]. 2011, n. o14. [Consulta 20 julio 2021] Disponible en: https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8427.pdf. ISBN 1989-4023.

FEDERACIÓN DE ENSEÑANZA DE CC.OO. DE ANDALUCÍA. *Ensayos no destructivos en la soldadura*. Revista temas para la educación. [En línea]. 2011, n. o13. [Consulta 20 julio 2021] Disponible en: https://www.feandalucia.ccoo.es/docuipdf.aspx?d=8259&s=. ISBN 1989-4023.

GUZMÁN ROMERO, Elís Efraín. "Efecto del proceso de soldadura por fricción radial en una aleación de aluminio AA 5754" *Instituto Superior Minero Metalúrgico ''Dr. Antonio Núñez Jiménez''*. [En línea], 2017, (Cuba). [Consulta: 25 mayo 2021]. Disponible en: http://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/1649.

JEFFUS, Larry. *Soldadura. Principios y aplicaciones* [En línea], Madrid-España: Paraninfo, 2009. [Consulta: 25 mayo 2021]. ISBN 978-1-40181-0467. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=rHynAxzh0iEC&oi=fnd&pg=PP1&dq=historia+de+la+soldadura&ots=bxHVcnkZ8Q&sig=Gl1B-_Lo8sSGKMpIV9XVWQorwCw#v=onepage&q&f=true.

LLULLUNA LLUMIQUINGA, Fredy Rafael. "Procesamiento de imágenes mediante software libre Python para el análisis metalográfico en aceros de bajo contenido de carbono". *Escuela Politécnica Nacional.* [En línea], 2014. [Consulta: 25 mayo 2021]. Disponible en: http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7171/1/CD-5361.pdf.

LÓPEZ GONZÁLEZ, Luis Ricardo. "Soldadura por Fricción". *Universidad del Bío - Bío.* [En línea], 2013, (Chile). [Consulta: 25 mayo 2021]. Disponible en: http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/1091/1/Lopez_Gonzalez_Luis_Ricardo.pdf.

MANGONO, Pat. *Ciencia de Materiales, Selección y Diseño*. 1ª ed. México: Pearson Education, 2001. ISBN 970-26-0027-8.

MOTT, Robert. *Resistencia de Materiales*. 5ta ed. México: Pearson Education, 2009. ISBN 9786074420470.

PAUCAR PEDRAZA, Jerson Patricio & SUQUILLO LEMA, Alexander David. "Soldabilidad y análisis comparativo del comportamiento de la soldadura por fricción (FRW) y la soldadura por fricción-agitación (FSW) en los polímeros Poliamida PA-66 y Polietileno". *Escuela Politécnica Nacional.* [En línea], 2018, (Ecuador). [Consulta: 26 mayo 2021]. Disponible en: https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19408/1/CD-8797.pdf.

RAJ SINGH, Bharat. *A Hand Book on Friction Stir Welding*. 1ª ed. [En línea]. UK: Lambert Academic Publishing, 2016. [Consulta: 28 mayo 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/235429608_A_Hand_Book_on_Friction_Stir_Welding.

REA CHELA, Paola Daniela & VÁSCONEZ MAYORGA, Karen Stephanie. "Influencia de los parámetros del proceso de soldadura fricción agitación (FSW) en la microestructura y propiedades mecánicas de placas de Aleación de Aluminio 6061 y 1100". *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.* [En línea], 2020, (Ecuador). [Consulta: 26 mayo 2021]. Disponible en: http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/13815/1/15T00730.pdf.

SANGUÑA VÁSCONEZ, Christian Miguel & YÉPEZ HERNÁNDEZ, **Jonathan Andrés.** "Diseño y construcción de un equipo para soldadura por fricción de torque continuo para el laboratorio de soldadura de la carrera de ingeniería mecánica de la UPS campus Kennedy". *Universidad Politécnica Salesiana.* [En línea], 2012, (Ecuador). [Consulta: 24 junio 2021]. Disponible en: https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/16833/1/UPS-KT00048.pdf.

SMITH, William y HASHEMI, Javad. *Fundamentos Ciencia e Ingeniería Materiales.*4ta ed. Mexico: McGraw-Hill Companies, 2014. ISBN 9701056388.

TOAPANTA BAUTISTA, Raúl Wladimir. "Estudio del proceso de soldadura por fricción agitación (FSW) y su incidencia sobre las propiedades mecánicas en uniones de perfiles de aluminio". *Universidad Técnica de Ambato.* [En línea], 2015, (Ecuador). [Consulta: 12 junio 2021]. Disponible en: http://repo.uta.edu.ec/bitstream/handle/123456789/5301/Mg.DCEv.Ed.1859.pdf?sequence=3. 2015.

UNIMACHINES. *Torno universal ZMM SLIVEN CU 400 x 2000*. [En línea]. España: UniMachines, 2021. [Consulta: 26 agosto 2021.]. Disponible en: https://unimachines.es/torno-universal-zmm---sliven-cu-400m-1997-37.html.

VILLAREAL GUZMAN, Oscar Eduardo. "Efecto de la soldadura por fricción rotativa en la microdureza fatiga y microestructura en juntas soldadas de aceros al carbono e inoxidables". *Universidad Nacional de Trujillo.* [En línea], 2019, (Perú). Disponible en: http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/14630.

ZMM BULGARIA. C*U400, CU500 Descripción*. [En línea]. Bulgaria, ZMM, 2020. [Consulta: 26 agosto 2021.] Disponible en: https://www.zmmbulgaria.com/es/products/universal_lathes/cu400,-cu500/

ANEXO

Anexo A. MEDIDAS DE LAS IDENTACIONES DE DUREZA VICKERS

DENOMINACIÓN	IZQUIERDA															DERECHA											
	MB			ZONA TRANSICIÓN			ZAT			ZATM			ZM			ZATM			ZAT			ZONA TRANSICIÓN			MB		
	d1(um	d2(um	HV1	d1(um	d2(um	HV2	d1(um	d2(um	HV3	d1(um	d2(um	HV4	d1(um	d2(um	HV5	d1(um	d2(um	HV6	d1(um	d2(um	HV7	d1(um	d2(um	HV8	d1(um	d2(um	HV9
1000-2	53	55	127	54	53	130	52	54	135	47	51	154	44	47	181	49	48	159	51	53	138	55	54	125	59	56	112
1000-3	56	60	110	53	54	130	54	52	132	52	48	150	45	46	181	48	52	148	53	51	138	55	52	130	53	57	123
1000-5	57	59	110	55	54	125	51	52	140	52	50	144	40	47	196	51	49	148	50	53	141	52	52	138	54	56	124
1250-1	55	54	125	52	53	135	52	52	138	49	50	154	47	47	170	52	49	147	53	51	137	54	54	130	56	54	123
1250-3	55	57	118	53	53	132	51	53	137	51	51	143	48	51	151	50	52	143	53	52	136	55	53	127	56	54	125
1250-4	54	53	130	54	53	130	52	53	137	52	50	144	46	48	170	49	50	154	52	52	140	54	53	131	53	55	130
1500-2	54	51	136	52	51	140	51	52	141	48	47	164	45	47	175	50	49	153	52	50	144	54	52	132	55	53	130
1500-3	53	52	136	53	50	140	50	50	150	49	47	164	46	49	166	49	49	156	52	50	144	53	54	131	55	53	128
1500-4	52	52	138	53	50	143	52	49	147	45	48	171	46	45	183	49	49	156	55	50	136	57	55	118	57	58	113