



## EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN ACERO ESTRUCTURAL A-36 EN LA FORMACIÓN DE FERRITAS

MARCELO RODRIGUEZ-VALDIVIA<sup>1</sup>, EDWIN JULIO URDAY-URDAY<sup>1</sup>, EDWIN ELIAS PANTIGOSO-GÓMEZ<sup>1</sup>, CESAR AUGUSTO ANDRADE-TACCA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa  
Facultad de Ingeniería de Procesos

Av. Independencia s/n Ciudad Universitaria, Arequipa, Perú

<sup>2</sup>Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa  
Instituto de Investigación de Ciencia y Gestión Ambiental "Antonio Brack" ICIGA-UNAS  
Calle San Agustín 104, 2do Piso, Arequipa Perú

*(Recibido 7 de julio de 2019, para publicación 15 de septiembre de 2022)*

**Resumen** – En el presente trabajo de investigación se determinó que la dureza y resistencia se incrementan notablemente para tratamientos a 850°C, debido a la formación de microestructuras martensíticas de bajo contenido de carbono. Para tratamientos a 725°C, estas características logran valores moderados por la presencia de una mezcla de martensita y ferrita (fases dobles). La perlita es sustituida por la fase martensita. La tenacidad resulta ser mayor para microestructuras martensíticas que para microestructuras de fases dobles (martensita-ferrita). El análisis fractográfico muestra para el primer caso, el tipo de fractura corresponde a intergranular-dúctil y el segundo caso, presenta un tipo de fractura quasi-clivaje originado por la disposición discontinua de la martensita en límites de grano que resulta una pobre capacidad para absorber energía. Las pruebas a 725°C evidenciaron la formación de combinaciones microestructural de martensita y ferrita, manifestando una buena combinación de resistencia y alargamiento. Se obtuvieron incrementos máximos en la resistencia a la tracción del orden de 51 y 54%, para mezclas microestructurales de 21% de martensita y 79% de ferrita; 21.24% de martensita y 78.76% de ferrita. Estas cantidades porcentuales de fases martensíticas y ferríticas, son coincidentes por otros autores para la definición de aceros de fases dobles.

**Palabras clave** – Clivaje, fases-dobles, ferrita, martensita, quasi-clivaje.

### 1. INTRODUCCIÓN

El problema siempre actual en caso del acero como un material de construcción, es como llegar a alta resistencia y una buena deformabilidad al mismo tiempo; aumentando los elementos de aleación especialmente de carbono, sube la resistencia mecánica del acero, pero se pierden las propiedades plásticas del material.

Existen numerosos estudios relacionados con la formación de fases dobles y su efecto sobre las propiedades mecánicas del material [1, 2]. Trabajos como los realizados por Ekrami [3] y De Geus [4] determinó experimentalmente el reparto de la deformación entre el componente microestructural “duro” y “blando” en estructuras ferrito-martensíticas y ferrito-perlíticas obtenidas mediante enfriamientos controlados. La variación en la fracción volumétrica de los microconstituyentes influye directamente en el comportamiento mecánico.

Con el propósito de buscar una nueva aplicación para el acero estructural A 36, se realiza el tratamiento térmico a temperaturas intercríticas (725°C) y se estudia el efecto sobre las propiedades mecánicas. Adicionalmente se considera de importancia estudiar la formación de martensita de bajo contenido de carbono.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Instrumentación

El tratamiento térmico de las diferentes muestras se realizó utilizando una Mufla de resistencias eléctricas Veb Elektro Bad Frankenhausen con controlador de temperatura de 100 a 1200°C.

Para el ensayo de dureza se utilizó un durómetro digital INDENTEC, eligiéndose la escala de dureza Rockwell B con aplicación de una carga de 100 kg-f y usando un microindentador de bola de acero de 1/16".

La ejecución del ensayo de tracción se realizó en un dinamómetro marca Mercial Határook Tipo RM 104 usando cargas de 10 000 y 5 000 kg-f. Las probetas empleadas se mecanizaron según medidas indicadas en la Norma ASTM E-8

El ensayo Charpy se realizó utilizando una máquina Veb Werkstoffprüfmaschinen Leipzig determinándose la energía al impacto para diferentes muestras tratadas.

La caracterización microestructural fue realizada usando un microscopio metalográfico METALAB. A fin de observar detalles microestructurales y analizar el tipo de fractura se vio por conveniente utilizar el Microscopio Electrónico de Barrido SEM Marca Phillips XL 20 con detector de electrones secundarios y microanalizador EDAX.

### 2.2. Materiales

El material empleado para la experimentación es un acero estructural ASTM A-36. A partir de una barra de sección cuadrada de 12 mm, se cortaron y se mecanizaron probetas según norma para ser sometidas a tratamiento térmico y posteriormente a ensayos mecánicos

La Tabla 1 presenta la composición química del material inicial corresponde a aquella indicada por el fabricante.

El acero ASTM- A 36 presenta una Resistencia mínima a la fluencia de 33.8 Kg/mm<sup>2</sup>; Resistencia mínima a la tensión de 45.8 kg/mm<sup>2</sup> y una elongación de 36%.

En la Fig. 1 se observa formaciones (islas) de perlita en una matriz de ferrita. Haciendo uso de la Metalografía cuantitativa se determina que el tamaño de grano ASTM estimado para esta microestructura es de 8 (método de Jeffries).

Tabla 1. Composición química nominal.

Calidad	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]
SAE 1020	0.26 máx.	0.60-0.90	0.40	0.040 máx.	0.050 máx.

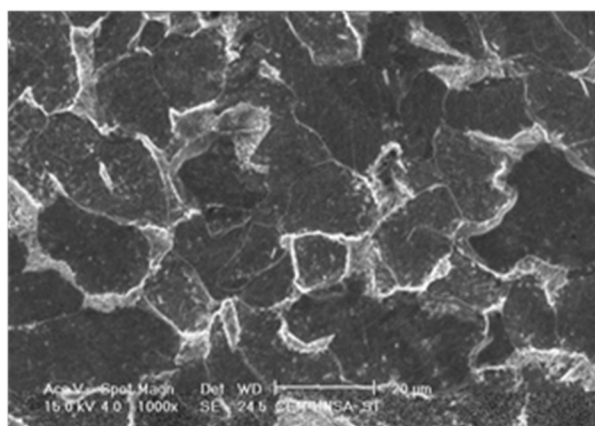


Fig. 1. Microestructura perlítica en matriz ferrítica. Microscopio Electrónico (SEM). Aumento 1000x. Nital.

### 2.3. Método Experimental

En probetas mecanizadas cilíndricas, se han realizado tratamientos de temple total utilizando agua a 18°C, 9.5°C y 1°C como medio de temple. Se consideraron temperaturas de austenización de 850°C, 787.5°C y 725°C y periodos de calentamiento de 60, 40 y 20 min.

### 2.4. Ensayo de Dureza

Se realizaron mediciones de dureza sobre la superficie de cada muestra, para tal propósito se limpió la cascarilla superficial producto del tratamiento térmico a fin de evitar en lo mínimo lecturas erróneas. Se aplicó un factor de corrección para determinar la dureza real teniendo en consideración la forma cilíndrica de las probetas ensayadas.

### 2.5. Ensayo de Tracción

La ejecución del ensayo de tracción se realizó con probetas mecanizadas según medidas indicadas en la Norma ASTM E-8. En la Fig. 2.

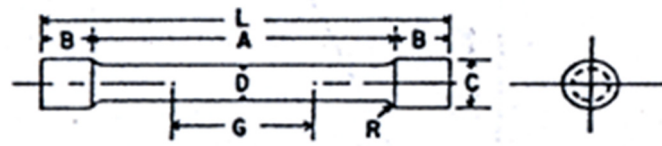


Fig. 2. Forma de la probeta mecanizada según Norma ASTM E-8.

### 2.6. Ensayo de Tenacidad

Se mecanizaron probetas de acuerdo con la norma ASTM E-23 que luego se trataron térmicamente.

### 2.7. Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

Se prepararon probetas metalográficas para su observación microscópica mediante SEM. El ataque químico para revelar la microestructura característica para cada muestra se realizó usando una solución de Nital al 3%, tanto para el material sin tratar, así como el tratado térmicamente [5].

### 2.8. Análisis Fractográfico

La observación de la fractura se realizó utilizando el microscopio electrónico. De esta manera, se pudo identificar el tipo de fractura para cada probeta tratada térmicamente, también Castillo [6] encontraron resultados similares.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Análisis de Dureza

El comportamiento de la dureza varía notoriamente de acuerdo con las condiciones de tratamiento térmico efectuado. La Tabla 2 muestra los valores de dureza obtenidos en unidades HRb.

### 3.2. Ensayo de Tracción

En probetas mecanizadas y tratadas, se determinó la carga máxima de rotura, deformación porcentual y reducción de área (estricción). La Tabla 3 muestra la resistencia a la tracción mostrada por las muestras ensayadas.

### 3.3. Ensayo de Tenacidad

La capacidad de adsorber esfuerzos de impacto fue medida en probetas charpy mecanizadas tratadas térmicamente a diferentes condiciones de prueba. La Tabla 3 presenta la energía al impacto adsorbida por las muestras ensayadas.

Tabla 2. Valores de Dureza a diferentes condiciones de tratamiento.

Temperatura de Calentamiento (°C)	Tiempo de Calentamiento (min)	Temperatura Medio de Temple (°C)	HRb	HRb
725	20	1	91.50	94.97
850	20	1	106.43	109.48
725	60	1	92.16	95.60
850	60	1	108.10	111.15
725	20	18	90.46	93.98
850	20	18	103.50	106.55
725	60	18	85.85	89.90
850	60	18	104.46	107.51
787.5	40	9.5	95.46	98.73
787.5	40	9.5	96.00	99.25
787.5	40	9.5	95.73	98.99
Sin tratamiento			66.90	69.43

Tabla 3. Resistencia a la tracción para muestras tratadas a condiciones diferentes y Energía adsorbida para muestras tratadas térmicamente.

Temperatura de Calentamiento (°C)	Tiempo de Calentamiento (min)	Temperatura Medio de Temple (°C)	F (Joules)	Rt (kg/mm <sup>2</sup> )
725	20	1	26.46	70.59
850	20	1	58.80	104.79
725	60	1	35.28	78.03
850	60	1	43.12	98.36
725	20	18	39.20	60.08
850	20	18	50.96	69.63
725	60	18	29.40	73.85
850	60	18	57.82	88.42
787.5	40	9.5	49.00	67.81
Sin tratamiento			161.7	35.81

### 3.4. Microscopia Electronica de Barrido (SEM)

La Fig. 3 presenta mezclas de microestructuras conseguidas por transformación a 725°C con tiempos de calentamiento y temperaturas del medio de temple.

La Fig. 4 presenta mezclas de microestructuras obtenidas por transformación a temperaturas superiores a las intercríticas (850°C), y con tiempos de calentamiento de 60 minutos y temperaturas del medio de enfriamiento 1°C.

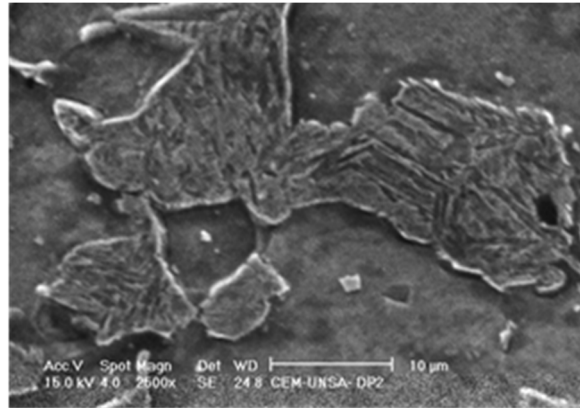


Fig. 3. Martensita en matriz ferrítica. Prueba a 725°C/60min/1°C. Aumento 2000x.

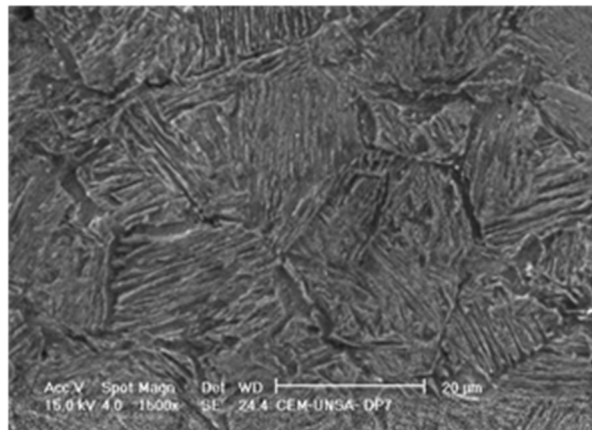


Fig. 4. Martensita y ferrita. Prueba a 850°C/60min/1°C. Aumento 1500x.

### 3.5. Fracción Volumétrica de Fases Duales (Martensita-Ferrita)

La Tabla 4 muestra las fracciones porcentuales de fases encontradas para cada micrografía analizada y la correlación de la fracción volumétrica con la Resistencia a la Tracción (Rt) y Alargamiento, Ghaheer [7] también encontraron resultados similares.

La Fig. 5 presenta la variación de la resistencia a la tracción y el alargamiento porcentual en función de la cantidad de martensita formada.

### 3.6. Análisis de la Formación de la Fase Martensita

A condiciones de ensayo empleando temperaturas de calentamiento del orden de 850°C, ocurre la transformación de la austenita en martensita de bajo contenido de carbono, tal comportamiento también fue observado por Yueyue Hu [8] y Erdogan [9]. La Tabla 5 muestra las características mecánicas para las pruebas realizadas a esta temperatura.

Tabla 4. Fracción Volumétrica de Fases.

Prueba	Ferrita (%)	Martensita (%)	Rt (kg/mm <sup>2</sup> )	Alargamiento (%)
725°C/20min/1°C	83.15	16.85	70.59	11.1
725°C/20min/18°C	86.05	13.95	60.08	13.5
725°C/60min/1°C	79.00	21.00	78.03	12.3
725°C/60min/18°C	78.76	21.24	73.85	13.0
787.5°C/40min/9.5°C	24.76	75.24	78.69	12.2
Sin tratamiento			35.81	20.0

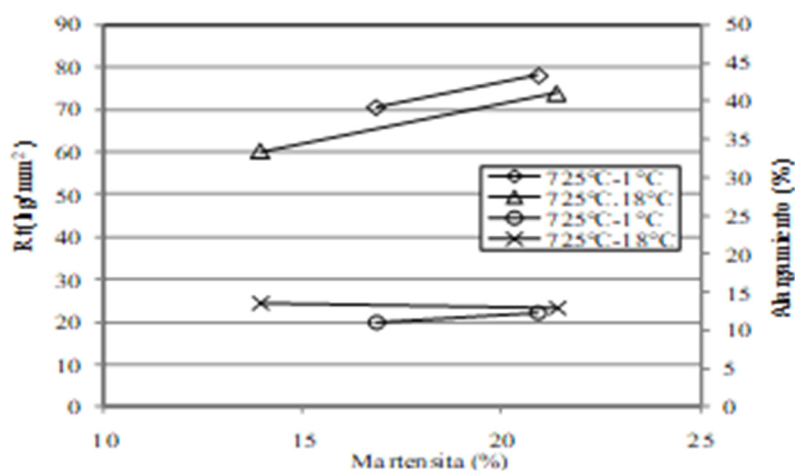


Fig. 5. Fractura del tipo quasi-clivaje. Prueba a 725°C/20min/18°C. Aumento 1000x.

Tabla 5. Resistencia a la Tracción (Rt) y Alargamiento porcentual.

Temperatura Calentam. (°C)	Tiempo Calentam. (min)	Temperatura Medio de Temple (°C)	Rt (kg/mm <sup>2</sup> )	Alargam. (%)	Incremento Rt (%)
850	20	1	104.79	9.1	65.07
850	60	1	98.36	8.3	63.59
850	20	18	69.63	10.6	35.81
850	60	18	88.42	9.9	59.50
Sin tratamiento			35.81	20.0	

### 3.7. Análisis Fractográfico

La observación de la superficie de fractura puede proporcionar información sobre los parámetros que caracterizan la rotura de las probetas ensayadas. Así, es posible tener una idea acerca de: Mecanismo de propagación de la fisura, fractoténacidad del material, configuración de tensiones, medio químico, origen de la fractura, etc.

Las figuras 6, 7, 8, 9, 10 y 11 presentan diferentes modos de fractura que corresponden a las diversas condiciones de prueba.

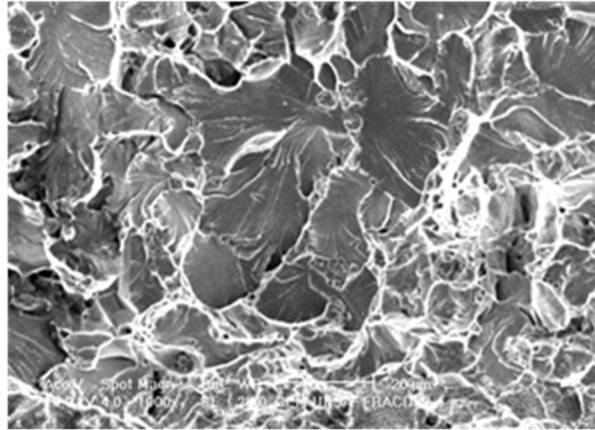


Fig. 6. Fractura del tipo quasi-clivaje. Prueba a 725°C/20min/18°C. Aumento 1000x.

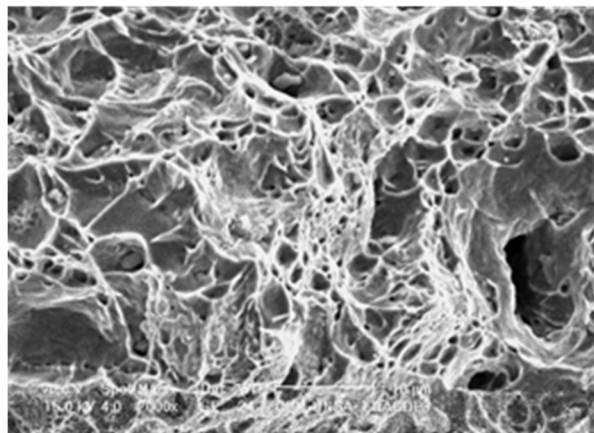


Fig. 7. Coalescencia de microcavidades de poca profundidad. Facetas de clivaje. Prueba a 725°C/60min/1°C. Aumento 2000x.

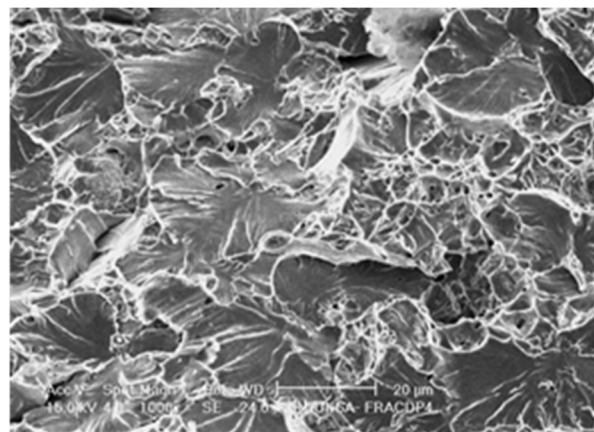


Fig. 8. Fractura del tipo quasi-clivaje. Microfisuras. Microcavidades de poca profundidad. Prueba a 725°C/60min/18°C. Aumento 1000x.

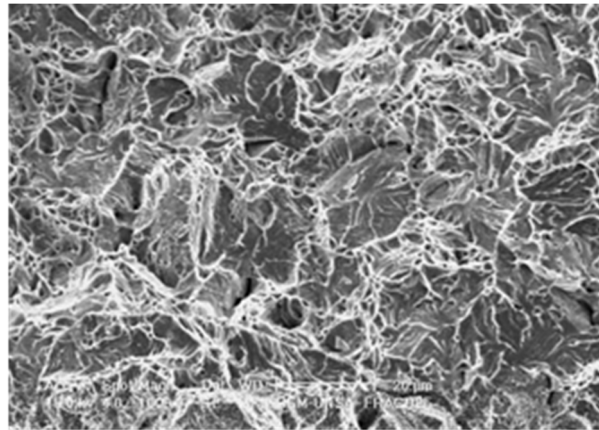


Fig. 9. Fractura quasi-clivaje. Prueba a 850°C/20min/1°C. Aumento 1000x.

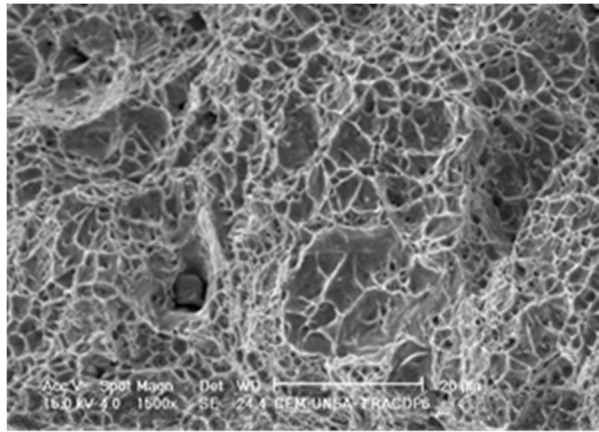


Fig. 10. Fractura intergranular dúctil. Microcavidades pequeñas. Prueba a 850°C/20min/18°C. Aumento 1500x.

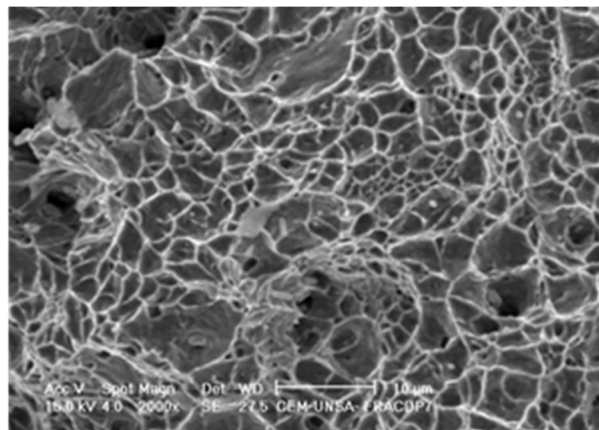


Fig. 11. Fractura intergranular dúctil. Microcavidades de diferente dimensión. Prueba a 850°C/60 min/1°C. Aumento 2000x.



## 4. DISCUSIÓN

### 4.1. Ensayo de Dureza: efecto del tiempo de calentamiento

Pruebas con una temperatura de calentamiento de 725°C y enfriando en agua a 1°C y 18°C:

- A 20 min, la dureza experimenta un descenso cuando se enfría en agua a 18°C. Se obtiene valores de 94.97 y 93.98 HRb.
- A 60 min, la dureza desciende mostrando un valor bajo enfriando en agua a 18°C. Los valores obtenidos son de 95.6 y 89.9 HRb.

Pruebas con una temperatura de calentamiento de 850°C y enfriando en agua a 1°C y 18°C:

- A 20 min, de igual forma la dureza experimenta un descenso cuando se enfría en agua a 18°C. Se obtiene valores de 109.48 y 106.55 HRb.

### 4.2. Ensayo de Dureza: Efecto de la temperatura de calentamiento

Pruebas con un tiempo de calentamiento de 20 min. y enfriando en agua a 1°C:

- La dureza se ve incrementada de 94.97 a 109.48 HRb cuando la temperatura de calentamiento pasa de 725 a 850°C.

Pruebas con un tiempo de calentamiento de 60 min. y enfriando en agua a 18°C:

- Se observa el mismo comportamiento que en el caso anterior, la dureza se eleva de 93.98 a 107.51 HRb cuando la temperatura de calentamiento pasa de 725 a 850°C.

### 4.3. Ensayo de Dureza: Efecto de la temperatura del medio de temple

Pruebas con un tiempo de calentamiento de 20 min. y una temperatura de calentamiento de 725°C:

- La dureza desciende de 94.97 a 93.98 HRb cuando la temperatura del medio de temple varía de 1 a 18°C.

Pruebas con un tiempo de calentamiento de 60 min. y una temperatura de calentamiento de 725°C:

- La dureza presenta el mismo comportamiento, la dureza desciende de 95.60 a 89.90 HRb cuando la temperatura del medio de temple varía de 1 a 18°C.

Pruebas con un tiempo de calentamiento de 20 min. y una temperatura de calentamiento de 850°C:

- La dureza desciende de 109.48 a 106.55 HRb cuando la temperatura del medio de temple varía de 1 a 18°C.

Pruebas con un tiempo de calentamiento de 60 min. y una temperatura de calentamiento de 850°C:

- La dureza presenta un comportamiento similar a lo visto anteriormente, la dureza decrece de 111.15 a 107.51 HRb cuando la temperatura del medio de temple varía de 1 a 18°C.

### 4.4. Ensayo de Tracción: Efecto del tiempo de calentamiento

Pruebas con una temperatura de calentamiento de 725°C y enfriando en agua a 1°C:

- La resistencia a la tracción experimenta un aumento de 70.59 a 78.03 kg/mm<sup>2</sup> al aumentar el tiempo de permanencia en el horno de 20 a 60 min.

Pruebas con una temperatura de calentamiento de 725°C y enfriando en agua a 18°C:

- La resistencia a la tracción tiende a aumentar en mayor grado de 60.08 a 73.85 kg/mm<sup>2</sup> cuando se aumenta el tiempo de calentamiento de 20 a 60 min.

Pruebas con una temperatura de calentamiento de 850°C y enfriando en agua a 1°C:

- La resistencia a la tracción presenta un comportamiento contrario a lo visto anteriormente, disminuye de 104.79 a 98.36 kg/mm<sup>2</sup> al aumentar el tiempo de permanencia en el horno de 20 a 60 min.

Pruebas con una temperatura de calentamiento de 850°C y enfriando en agua a 18°C:

- La resistencia a la tracción crece de 69.63 a 88.42 kg/mm<sup>2</sup> cuando se aumenta el tiempo de calentamiento de 20 a 60 min.

#### 4.5. Ensayo de Tracción: Efecto de la temperatura de calentamiento

Pruebas con un tiempo de calentamiento de 20 min. y enfriando en agua a 1°C:

- La resistencia a la tracción se ve incrementada de 70.59 a 104.79 kg/mm<sup>2</sup> cuando la temperatura de calentamiento pasa de 725 a 850°C.

Pruebas con un tiempo de calentamiento de 60 min. y enfriando en agua a 18°C:

- Se observa un incremento en la resistencia a la tracción, pero en menor magnitud; de 73.85 a 88.42 kg/mm<sup>2</sup> cuando la temperatura de calentamiento pasa de 725 a 850°C.

#### 4.6. Ensayo de Tracción: Efecto de la temperatura del medio de temple

Pruebas con un tiempo de calentamiento de 20 min. y una temperatura de calentamiento de 725°C:

- La resiliencia aumenta de 26.46 a 39.20 Jouls cuando la temperatura del medio de temple varía de 1 a 18°C.

Pruebas con un tiempo de calentamiento de 60 min. y una temperatura de calentamiento de 725°C:

- La resiliencia disminuye de 35.28 a 29.40 Jouls cuando la temperatura del medio de temple varía de 1 a 18°C.

Pruebas con un tiempo de calentamiento de 20 min. y una temperatura de calentamiento de 850°C:

- Se observa un descenso de la resiliencia de 58.80 a 50.96 Jouls cuando la temperatura del medio de temple varía de 1 a 18°C.

Pruebas con un tiempo de calentamiento de 60 min. y una temperatura de calentamiento de 850°C:

- La resiliencia aumenta de 43.12 a 57.82 Jouls cuando la temperatura del medio de temple varía de 1 a 18°C.

#### 4.7. Ensayo de Tenacidad: Efecto del tiempo de calentamiento

Pruebas con una temperatura de calentamiento de 725°C y enfriando en agua a 1°C:

- La resiliencia experimenta un aumento de 26.46 a 35.28 Jouls, al aumentar el tiempo de permanencia en el horno de 20 a 60 min.

Pruebas con una temperatura de calentamiento de 850°C y enfriando en agua a 1°C:

- La resiliencia tiende a descender de 58.80 a 43.12 Jouls, cuando se aumenta el tiempo de calentamiento de 20 a 60 min.

Pruebas con una temperatura de calentamiento de 725°C y enfriando en agua a 18°C:

- Para esta temperatura de calentamiento, la resiliencia presenta un comportamiento contrario a lo visto anteriormente, disminuye de 39.20 a 29.40 Jouls, al aumentar el tiempo de permanencia en el horno de 20 a 60 min.

Pruebas con una temperatura de calentamiento de 850°C y enfriando en agua a 18°C:

- La resiliencia aumenta de 50.96 a 57.82 Jouls, cuando el tiempo de calentamiento pasa de 20 a 60min.

#### 4.8. Ensayo de Tenacidad: Efecto de la temperatura de calentamiento

Pruebas con un tiempo de calentamiento de 20 min. y enfriando en agua a 1°C:

- La resiliencia se ve incrementada de 26.46 a 58.80 Jouls cuando la temperatura de calentamiento pasa de 725 a 850°C.

Pruebas con un tiempo de calentamiento de 20 min. y enfriando en agua a 18°C:

- Presenta un incremento en la resiliencia de 39.20 a 50.96 Jouls cuando la temperatura de calentamiento pasa de 725 a 850°C.

Pruebas con un tiempo de calentamiento de 60 min. y enfriando en agua a 1°C:

- La resiliencia se ve incrementada de 35.28 a 43.12 Jouls cuando la temperatura de calentamiento pasa de 725 a 850°C.

Pruebas con un tiempo de calentamiento de 60 min. y enfriando en agua a 18°C:

- Presenta un incremento en la resiliencia de 29.40 a 57.82 Jouls cuando la temperatura de calentamiento pasa de 725 a 850°C. Se puede concluir que la resiliencia es siempre mayor considerando una temperatura de calentamiento igual a 850°C.

#### 4.9. Ensayo de Tenacidad: Efecto de la temperatura del medio de temple

Pruebas con un tiempo de calentamiento de 20 min. y una temperatura de calentamiento de 725°C:

- La resiliencia aumenta de 26.46 a 39.20 Jouls cuando la temperatura del medio de temple varía de 1 a 18°C.

Pruebas con un tiempo de calentamiento de 60 min. y una temperatura de calentamiento de 725°C:

- La resiliencia disminuye de 35.28 a 29.40 Jouls cuando la temperatura del medio de temple varía de 1 a 18°C.

Pruebas con un tiempo de calentamiento de 20 min. y una temperatura de calentamiento de 850°C:

- Se observa un descenso de la resiliencia de 58.80 a 50.96 Jouls cuando la temperatura del medio de temple varía de 1 a 18°C.

Pruebas con un tiempo de calentamiento de 60 min. y una temperatura de calentamiento de 850°C:

- La resiliencia aumenta de 43.12 a 57.82 Jouls cuando la temperatura del medio de temple varía de 1 a 18°C.

#### 4.10. Ensayo de Tenacidad: Análisis de la formación de la fase martensita

La formación de martensita de bajo contenido de carbono hace posible alcanzar valores de resistencia a la tracción altos con desmedro importante de la ductilidad.

- A 850°C/20 min/1°C, la resistencia a la tracción se ve incrementada en 65.07%, correspondiendo un valor de 104.79 kg/mm<sup>2</sup>.
- A 850°C/60 min/1°C, la resistencia a la tracción se incrementa en un 63.59%, alcanzando un valor de 98.36 kg/mm<sup>2</sup>.
- A 850°C/60 min/18°C, la resistencia a la tracción se incrementa en un 59.50%, alcanzando un valor de 88.42 kg/mm<sup>2</sup>. En cuanto al alargamiento porcentual se evidencia que éste decrece hasta un valor de 9.1%.

#### 4.11. Microscopia Electrónica de Barrido: Análisis Microestructural

La muestra sin tratamiento presenta islas de perlita en una matriz de ferrita equiaxial, (Fig. 1).

*Para pruebas a 725°C/60 min/1°C:* Microestructura compuesta por martensita acicular en una matriz de ferrita alotriomorfa, (Fig. 3).

*Para pruebas a 850°C/20 min/18°C; 850°C/60 min/1°C:* Martensita acicular y granos de ferrita inicial, (Fig. 4).

#### 4.12. Microscopia Electrónica de Barrido: Análisis fractográfico

*Para pruebas a 725°C:* Presenta facetas de fractura del tipo clivaje y quasi-clivaje con coalescencia de microcavidades de poca profundidad, (Figuras 6 y 7).

*Para pruebas a 850°C:* A un tiempo de calentamiento de 20 min, y una temperatura de medio de temple igual a 1°C; se producen facetas de fractura quasi-clivaje con zonas con microcavidades y microfisuras.

Para condiciones de prueba diferentes, la fractura del tipo intergranular dúctil se hace predominante, (Figuras 9 y 10).

### 5. CONCLUSIONES

La dureza y resistencia se ven incrementadas notablemente para tratamientos a 850°C, debido a la formación de microestructuras martensíticas de bajo contenido de carbono. Para tratamientos a 725°C, estas características logran valores moderados por la presencia de una mezcla de martensita y ferrita (fases dobles). La perlita es sustituida por la fase martensita.

La tenacidad resulta ser mayor para microestructuras martensíticas que para microestructuras de fases dobles (martensita-ferrita). El análisis fractográfico muestra que, para el primer caso, el tipo de fractura corresponde a intergranular-dúctil y para el segundo caso, presenta un tipo de fractura quasi-clivaje originado por la disposición discontinua de la martensita en límites de grano que resulta en una pobre capacidad para absorber energía.

Las pruebas a 725°C evidenciaron la formación de combinaciones microestructurales de martensita y ferrita, manifestando una buena combinación de resistencia y alargamiento. Se obtuvieron incrementos máximos en la resistencia a la tracción del orden de 51 y 54%, para mezclas microestructurales de 21% de martensita y 79% de ferrita; 21.24% de martensita y 78.76% de ferrita.

Las pruebas a 850°C mostraron la formación de fases martensíticas de bajo contenido de carbono, lográndose incrementos máximos de la resistencia a la tracción de 63.59% y 65.07% cuando se utilizó medios de temple fríos (agua a 1°C).

El análisis microscópico reveló la presencia de mezclas de ferrita idiomórfica y martensita cuando se realizó el tratamiento térmico a temperaturas intercríticas (725°C y 787.5°C). La ferrita idiomórfica se forma en un rango de temperaturas que varía desde unas decenas de grados por debajo de la temperatura de inicio de descomposición de la austenita en ferrita,  $Ae_3$ , hasta la temperatura donde las transformaciones de origen difusional empiezan a ser relativamente lentas y comienzan a tener lugar las transformaciones de origen no difusional tales como la ferrita Widmanstätten, la bainita y la martensita.

Se observó martensítica acicular y ferrita en muestras tratadas a 850°C. La observación al microscopio electrónico de barrido (SEM), confirmó la presencia de martensita del tipo acicular y ferrita.

En muestras tratadas a 725 y 787.5°C, se identificó fracturas de quasi clivaje y bordes de desgarramiento con cavidades de poca profundidad. Se caracteriza por tener un mecanismo mixto al fracturar mediante clivaje y coalescencia de microcavidades. Es muy común en aceros de estructura martensítica templados y revenidos.

Se obtienen mezclas de martensita y ferrita cuando se realiza el tratamiento térmico a temperaturas de calentamientos intercríticas (725°C–787.5°C). Las formaciones de estas microestructuras mejoran la resistencia a la tracción en un promedio de 52.5%, manteniendo una buena ductilidad del 12.6% en promedio.

Es posible formar fases dobles de martensita y ferrita tratando térmicamente un acero estructural A-36. aplicando un calentamiento a temperatura intercrítica y enfriamiento rápidamente, la formación de la perlita es frenada y en su lugar se forma martensita.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y de Ingeniería de Materiales de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa por el apoyo para el desarrollo del presente proyecto.

## REFERENCIAS

- [1] Rodríguez, R., Gutiérrez, I., Estudio de la Contribución de las Fases a las Propiedades Mecánicas en Aceros con Estructuras Mixtas. *VIII Congreso Internacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos*, Gandia (2002)
- [2] Dalalli Isfahani, T., Shafyei, A., Sharifi, H., “Impact and tensile properties of ferrite–martensite dual-phase steels”. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 32, 141-147 (2009) doi:10.1111/j.1460-2695.2008.01318.x
- [3] Ekrami, A., “High temperature mechanical properties of dual phase steels”. *Matt. Lett.*, **59**(16), 2070-2074 (2005)
- [4] De Geus, T.W.J., Peerlings, R.H.J., Geers, M.G.D., “Competing damage mechanisms in a two-phase microstructure: How microstructure and loading conditions determine the onset of fracture”, *International Journal of Solids and Structures*, 97-98, 687-698 (2016) doi:10.1016/j.ijsolstr.2016.03.029
- [5] Reitera, J., Bernharda, C., Presslingerb, H., “Austenite grain size in the continuous casting process: Metallographic methods and evaluation”, *Materials Characterization*, 59, 737-746 (2008) doi:10.1016/j.matchar.2007.06.003
- [6] Castillo, D., Angarita, I., Rodríguez, R., “Caracterización microestructural y mecánica de aceros de fase dual (ferrita-martensita). obtenidos mediante procesos térmicos y termomecánicos”, *Revista chilena de ingeniería*, 26(3), 430-439 (2017) doi:10.4067/S0718-33052018000300430.
- [7] Ghaheri, A., Shafyei, A., Honarmand, M., “Effects of Inter-critical Temperatures on Martensite Morphology”, Volume Fraction and Mechanical Properties of Dual-Phase Steels obtained from Direct and Continuous Annealing Cycles. *Materials and Design*, 62, 305-319 (2014) doi:10.1016/j.matdes.2014.04.073
- [8] Yueyue, H., Xiurong, Z., Rutao, L., Zhazhan, Z., “Effect of Initial Microstructures on the Properties of Ferrite-martensite Dual-phase Pipeline Steels with Strain-based Design”. *Materials Research*, **15**(2), 317-322 (2012) doi:10.1590/S1516-14392012005000021
- [9] Erdogan, M., “The effect of new ferrite content on the tensile fracture behaviour of dual phase steels”, *Journal of Materials Science*, 37, 3623-3630 (2002) doi:10.1023/a:1016548922555

## EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL STEEL A-36 ON TO FERRITE FORMATION

**Abstract** – In the present investigation it was determined that the hardness and strength are increased markedly to treatment at 850°C due to the formation of martensitic microstructure of low carbon. Treatment at 725°C, these features moderate values achieved by the presence of a mixture of ferrite and martensite (dual-phases). Pearlite is replaced by the martensite phase. The toughness turns out to be higher for martensitic microstructures for dual phase microstructures (martensite-ferrite). The fractography analysis shows that for the first case, the type corresponds to intergranular fracture-ductile and for the second case, presents a quasi-type cleavage fracture caused by the discontinuous arrangement of martensite grain boundaries resulting in poor ability to absorb energy. The tests at 725°C showed the formation of micro structural combinations of martensite and ferrite, showing a good combination of strength and elongation. Maximum increases were obtained in the tensile strength of the order of 51 and 54% for mixtures microstructural 21% martensite and 79% ferrite; 21.24% martensite and 78.76% ferrite. These quantities of martensitic and ferritic phases coincide with those considered by others to define dual phase steels.

**Keywords** – Clivage, Dual Phases, Ferrite, Martensite, Quasi-Clivage.