

# Evaluación del estado tensional-deformacional del soporte soldado de los rodamientos del arado AFT-4

## TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**Autor:** Javier Alejandro Reyes Rodríguez

**Tutores:** MSc. Ing. Pavel Almaguer Zaldívar  
MSc. Ing. José Martínez Grave de Peralta

**Holguín, 2021**



## PENSAMIENTO

*“Solo la ciencia, la técnica y la productividad podrán enfrentar el grandioso desafío que tiene por delante un planeta que se empobrece y cuya tierra agrícola y agua potable disminuyen año por año”.*

**Fidel Castro Ruz**



## AGRADECIMIENTOS

*A mi familia, por creer siempre en lo que puedo ser, en especial a mis padres por todos los años de sacrificio y apoyo incondicional.*



## RESUMEN

El arado de discos es el utensilio agrícola idóneo para labrar gran variedad de suelos evitando con mayor facilidad los obstáculos, dada sus características es utilizado a nivel mundial y en Cuba. El país cuenta con numerosas variedades de arados de discos de buena calidad.

La presente investigación tiene como objetivo obtener el estado tensional del soporte soldado de los rodamientos en el arado AFT-4 fabricado en la empresa mecánica de Holguín, principal organización destinada a la producción de implementos agrícolas de la provincia y una de las más importantes del país.

Para ello se tuvieron en cuenta criterios económicos, estéticos, de funcionalidad y de factibilidad de producción. Al acometer la fabricación del equipo en cuestión se pueden sustituir importaciones e incluso exportar este a otros países.



## ABSTRACT

The disc plow is the ideal agricultural tool to till a great variety of soils, avoiding obstacles more easily, given its characteristics it is used worldwide and in Cuba. The country has many varieties of good quality disc plows. The objective of this research is to obtain the stress status of the welded support of the bearings in the AFT-4 plow manufactured in the mechanical company of Holguín, the main organization dedicated to the production of agricultural implements in the province and one of the most important in the country. For this, economic, aesthetic, functionality and production feasibility criteria were taken into account. By undertaking the manufacture of the equipment in question, imports can be substituted and even exported to other countries.



## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL. ....	5
1.1 Introducción al capítulo. ....	5
1.2 Mecanización de la agricultura.....	5
1.2.1 La mecanización en la etapa revolucionaria. ....	6
1.3 Surgimiento y desarrollo de los arados de discos. ....	7
1.3.1 Principales diseños y características de explotación de los arados de discos en el mundo. ....	10
1.4 Métodos de aradura con arados de discos. ....	14
1.4.1 Métodos de aradura del arado de discos fijo. ....	14
1.4.2 Método de aradura del arado de discos reversibles.....	16
1.5. Arado fijo tubular AFT-4.....	17
1.6 Método de los Elementos Finitos.....	20
1.6.1 Software para la obtención del modelo (SolidWorks).....	24
1.6.2 Análisis con el empleo del software SolidWorks/Simulation. ....	26
1.6.3 Análisis de diseño. ....	27
CAPÍTULO II. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA EL CÁLCULO DEL ESTADO TENSIONAL-DEFORMACIONAL DEL SOPORTE SOLDADO DE LOS RODAMIENTOS DEL ARADO AFT-4. ....	32
2.1 Introducción al capítulo. ....	32
2.2 Soporte soldado de los rodamientos del arado de disco AFT-4.....	32
2.3. Análisis de la fractura del soporte ....	33
2.4. Definición del modelo geométrico. ....	33
2.5. Caracterización de los materiales. ....	34
2.6. Cálculo de la fuerza de tracción que demanda el arado AFT-4 ....	36
2.7. Estado tensional-deformacional del soporte soldado de los rodamientos.....	38
CONCLUSIONES.....	43
RECOMENDACIONES .....	44



BIBLIOGRAFÍA.....	45
ANEXOS.....	48



## INTRODUCCIÓN

Hace mucho tiempo cuando el ser humano empezó sus inicios, una de las principales actividades que realizó para su existencia y desarrollo fue la agricultura, evolucionada desde la recolección, la caza y la pesca. Las razones a conllevar el desarrollo de esta actividad pudieron ser, los cambios climáticos, variaciones en las temperaturas, la escasez de caza o alimentos de recolección, o a la desertización de amplias regiones.

La agricultura es el arte del cultivo y explotación de la tierra con el objeto de obtener productos con fines humanos. Existen variadas disciplinas y toda una infraestructura agrícola, científica e industrial alrededor de estas actividades. Se incluyen en estas prácticas el estudio, acondicionamiento de las tierras, cultivo, desarrollo, recolección, transformación, distribución, etc. Entre las variadas producciones agrícolas, se distinguen algunos productos muy importantes para el ser humano, tales como los cereales, trigo, maíz, frijoles, arroz, etc.

Debido a las necesidades del hombre encontradas en el trabajo de la agricultura, surgen las primeras herramientas para facilitar esta actividad, donde se pueden destacar las hoces para recoger el grano, azadas para cavar la tierra, e incluso arados rudimentarios a base de ramas de árboles convenientemente modificadas para levantar y voltear la tierra a mano, con el objetivo de prepararlas para la siembra.

Hoy en día todo ese trabajo y preparación de la siembra es centralizado en la mecanización agrícola donde es el proceso de la utilización de la maquinaria permitiendo la multiplicación de la productividad por 20, a veces por 70, y hasta por 100 la productividad del trabajo. En los tiempos modernos, la maquinaria motorizada ha reemplazado muchos trabajos antes realizados por hombres o animales, como vacas, caballos y mulas. La mecanización fue uno de los factores responsables de las economías industriales, debido a la mejora de la eficiencia de la producción y la producción a gran escala con una elevada calidad de los productos agrícolas. Por otra parte, desplaza la mano de obra agrícola no calificada.

Actualmente el principal problema que tiene el agricultor para mecanizar su explotación es el factor económico, no menos preocupación supone el no realizar las inversiones necesarias y quedarse en inferioridad respecto del resto de los otros agricultores, incurriendo, a veces, en un efecto social de imagen además de poder incurrir en una falta de competitividad.

Evaluación del estado tensional-deformacional del soporte soldado de los rodamientos del arado AFT-4



Sin embargo, tampoco se puede ignorar la repercusión medio-ambiental que ha tenido este proceso intensivo de mecanización en el suelo, provocando un deterioro paulatino de éste y de su estructura, así como un aumento progresivo de la erosión que inciden fuertemente en los rendimientos y por ello, en la rentabilidad del agricultor. Todo ello, y los profundos cambios agrarios que se están produciendo, hacen que la mecanización sea un elemento, dentro de la agricultura, de gran interés y justifiquen su estudio.

La mecanización en Cuba es una obra de la revolución; en 1959 había en nuestro país más de 9000 tractores de muy baja potencia, por lo que la absoluta mayoría de las labores de campo se realizaban con bueyes o a mano, con implementos rudimentarios. Una de las primeras medidas de la revolución fue el comienzo de suministro de tractores y otras máquinas agrícolas a los campesinos y las organizaciones de cooperativas para un mejor aprovechamiento de las tierras nacionalizadas a los latifundistas.

Desde los primeros años se contó para ello con la ayuda de antigua Unión Soviética y de otros países del campo socialista en el suministro de maquinarias y otros insumos mediante relaciones equitativas y de mutuo beneficio. Fruto de esta colaboración se aprobaron e introdujeron en Cuba nuevas líneas de máquinas desconocidas, como son las cosechadoras de hortalizas, acanteradores y cultivadores múltiples, equipos para la cosecha, manipulación y transportación de frutos en cajas paletas, etc.

En la actualidad en nuestro país, debido a la situación económica y el bloque, el sector particular no puede mecanizar su trabajo con máquinas de primera tecnología para mejorar su productividad y eficiencia, lo que ha provocado la oportunidad de la innovación, debido al trabajo y necesidades que se le presenta debido a su labor, esto se ha realizado con los medios y recursos que han podido contar en ese momento de materia prima de desecho, trayendo como problema a menudo que se rompa;

Teniendo en cuenta lo antes referido planteamos como **situación problemática** la siguiente: el arado AFT-4 no tiene mecanismos para la regulación de los ángulos de ataque y penetración lo que provoca mayor severidad en su funcionamiento, así como roturas frecuentes en el soporte soldado de los rodamientos.

Dando paso al siguiente **problema de investigación**: desconocimiento del estado tensional-deformacional del soporte soldado de los rodamientos en un arado AFT-4.

**El objeto de estudio de la investigación se centra en:** El arado de discos AFT-4 y su **campo de acción se enmarca en:** El estado tensional-deformacional del soporte soldado de los rodamientos del arado AFT-4.



Se plantea como **hipótesis**: Si se calcula mediante el método de los elementos finitos el soporte soldado de los rodamientos del arado, será posible conocer el estado tensional deformacional del mismo.

Para dar solución a la problemática planteada se plantea como **Objetivo general**: Determinar el estado tensional- deformacional del soporte soldado de los rodamientos del arado AFT-4.

Para dar cumplimiento al objetivo general planteado se derivan los siguientes **Objetivos Específicos**:

1. Definir el modelo geométrico del soporte.
2. Caracterizar los materiales del soporte.
3. Determinar las secciones peligrosas del soporte.
4. Proponer mejoras del soporte, de ser necesario.

**Tareas de la investigación:**

1. Búsqueda de bibliografía e información sobre el tema tratado.
2. Estudio de las características mecánicas de los materiales utilizados.
3. Simular el comportamiento del soporte ante las cargas aplicadas.
4. Elaborar el informe del trabajo de diploma.

**Métodos de Investigación.**

**1.- Empíricos:**

- **Consulta con expertos:** Se programarán entrevistas a profesores con el objetivo de obtener información sobre el tema para una correcta proyección de la investigación al aporte de datos a fin.
- **Método de observación:** Visualización y evaluación de las características de los materiales utilizados.
- **Método de modelación:** Método numérico o de análisis por elementos finitos y simulación gráfica.

**2.- Teóricos:**

- **Histórico – lógico:** Se estudian los antecedentes en el tema teniendo en cuenta las investigaciones preliminares y sus respectivos resultados obtenidos reflejándolo en la bibliografía.
- **Análisis y Síntesis:** Se basa en el método de análisis ya que se estudiarán, revisarán y analizarán bibliografías correspondientes al tema, al igual que el software utilizado de lo que se realizará una síntesis para la elaboración del informe técnico correspondiente.



**Resultados esperados:**

Con la realización de este trabajo se determinará el estado tensional y deformacional del soporte de los rodamientos del arado de discos AFT-4, para conocer si es posible realizarle mejoras a la configuración dada por los constructores.

Se considera como **Novedad Científica**: que por primera vez se logra la simulación del comportamiento del soporte de los rodamientos del arado de discos AFT-4 mediante el Método de Elementos Finitos.



## **CAPÍTULO I. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL.**

### **1.1 Introducción al capítulo.**

En este capítulo se presenta un análisis de la revisión bibliográfica realizada, donde se examinan los aspectos esenciales relacionados con la mecanización agrícola, en específico con el arado y el software utilizado para los estudios del estado tensional y deformacional que surgen en dichas estructuras portantes, con fin de obtener resultados concretos respecto a su diseño.

### **1.2 Mecanización de la agricultura.**

La mecanización de la agricultura es una de las ramas de la Ingeniería Agrícola que tiene como objetivo diseñar, seleccionar, estudiar y recomendar máquinas y equipos de uso agroindustrial con el fin de acelerar la productividad y eficiencia de las actividades de la agricultura.

Muchos factores han contribuido a la mecanización de la agricultura. Los hechos más significativos son las necesidades de reducir las demandas laborales, reducir el trabajo fatigante hecho por el hombre e incrementar la productividad, entre otras. El trabajo agrícola es agotador físicamente y las condiciones de trabajo son adversas. En términos generales la mecanización reduce el trabajo físico humano; es menos extenuante conducir un tractor que cultivar el campo todo el día con un azadón o en caso de siembra de granos (maíz, frijol, etc.), hacer el trabajo manual que con una sembradora.

Una sembradora de granos puede sembrar un área más grande que un hombre con una herramienta manual en el mismo tiempo, con el consecuente incremento de la productividad y reducción en los tiempos de operación aumentando los rendimientos considerablemente. La demanda de mano de obra, varía durante la siembra. Es necesario mayor número de obreros durante la labranza y la cosecha, que durante otros períodos del crecimiento de las plantas. Esta fluctuación en la mano de obra crea problemas logísticos desde el punto de vista de la administración y programación del trabajo. Con la mecanización es posible reducir la demanda en los picos de demanda laboral y mantener una fuerza laboral estable.

La definición y análisis de la secuencia de operaciones mecánicas para la producción de cultivos son pertinentes, para la optimización del recurso máquina, tiempo y costos. En función de las condiciones del clima, suelo y del cultivo, son diferentes las operaciones, su secuencia y las características de los equipos. Por ello, la selección y planificación de



las máquinas dentro de un proceso de mecanización debe estar soportada por el análisis de operaciones (labores mecánicas).

### **1.2.1 La mecanización en la etapa revolucionaria.**

La mecanización agropecuaria en Cuba es una obra de la Revolución. En 1959 había en nuestro país no más de 9000 tractores de muy baja potencia, por lo que la absoluta mayoría de las labores de campo se realizaban con bueyes o a mano, con implementos rudimentarios. Una de las primeras medidas de la Revolución fue el comienzo de suministro de tractores y otras máquinas agrícolas a los campesinos y la organización de cooperativas para un mejor aprovechamiento de las tierras nacionalizadas a los latifundistas.

Se comenzó a considerar la mecanización de la agricultura en forma integral, y para ello se elaboraron los primeros Sistemas de Máquinas, o sea, los listados de medios técnicos a utilizar por cada uno de los cultivos y actividades, con sus características y variantes según las condiciones de producción, recomendados teniendo en cuenta los resultados de las pruebas e investigaciones, y definiendo aquellos equipos que aún no existían en el país pero que había que desarrollar o importar. Con ello también se definían los trabajos ulteriores de investigación y prueba. Se comenzó a trabajar también en las investigaciones sobre explotación técnica y organización de la maquinaria, la reparación, el mantenimiento, la recuperación de piezas, el ahorro de combustible, etc.

Producto de los trabajos de investigación y prueba se introdujo la línea de máquinas para la cosecha mecanizada de la papa, procedente en gran parte de Canadá, las combinadas y otros equipos italianos para la cosecha de arroz, la línea australiana de equipos de cultivo de caña. Además del desarrollo y construcción en Cuba de la línea de máquinas para los cítricos.

Una de las máquinas que resultaron de gran impacto fueron las cosechadoras de habichuelas, introducidas en la provincia de La Habana en el período 1976-1988. Para la cosecha de frijol se desarrollaron e introdujeron máquinas de corte y prehilerado de las plantas, así como diversos modelos de trilladoras.

El desarrollo logrado en los años del período revolucionario permitió dotar a nuestra agricultura de una amplia infraestructura en máquinas, instalaciones para su reparación y mantenimiento, un personal capacitado en su explotación y en una estructura administrativa acorde con los cambios operados en la rama.



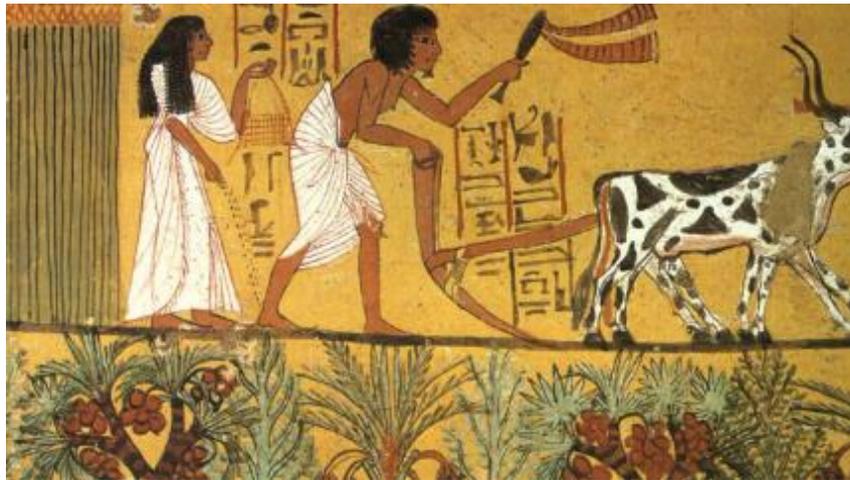
### ***El período especial y la mecanización agrícola.***

Con la desaparición del campo socialista se produjo una aguda escasez de combustibles, piezas de repuestos y otros insumos que antes se recibían a bajos precios de la desaparecida Unión Soviética. El parque en casi su totalidad se encuentra envejecido y en muy mal estado técnico, y en esto tiene gran peso los años de explotación de estos equipos. El 79% de los tractores existentes tienen más de 15 años de explotación, lo cual influye sobre su baja disponibilidad. Semejante situación presentan las demás máquinas e implementos y otros medios técnicos agropecuarios. Entre las tareas para paliar esta situación el Instituto de Investigaciones de Mecanización Agrícola (IIMA) acometió la tarea de desarrollar una nueva línea de implementos y tecnologías conservacionistas con tracción mecanizada y animal, mientras se continúan las investigaciones para la evaluación de equipos modernos que permitan ir sustituyendo gradualmente los existentes, en dependencia de los recursos disponibles.

#### **1.3 Surgimiento y desarrollo de los arados de discos.**

El arado apareció hace alrededor de 5500 años en las civilizaciones del Oriente Medio, específicamente en los pueblos de la Mesopotamia, ubicados entre el Éufrates y el Tigris. Los ríos, que fertilizaban el suelo, permitían a los asirios y caldeos, dedicarse a la agricultura. Fueron los primeros en usar la rueda, y luego emplearon los primeros arados. Los antiquísimos dibujos que se han hallado en forma de pinturas y grabados rupestres son testimonio de que éste fue uno de los primitivos instrumentos usados por el hombre. Los primeros arados eran de madera, formados por un trozo de madera de forma adecuada, y se operaban con tracción humana. Hace unos 5000 años comienzan a emplearse los bueyes para su tracción, como se muestra en la Fig. 1.1. Los romanos introdujeron el arado con una cuchilla de hierro, también tirados por bueyes. En la Edad Media, en los suelos más duros de Europa, se comenzó a usar el arado de rejas y cuchillas. (Anónimo, 2018)





**Fig. 1.1** Arado de madera tirado por animales. (Singh, 2017)

El arado Rotherham fue construido en Inglaterra en 1730, y su forma triangular redujo la fuerza de tiro, por lo que se adaptó mejor para ser halado por caballos. Fue construido por el holandés Joseph Foljambe y marca el comienzo de su fabricación industrial.

El primer arado construido completamente de hierro lo realiza el inglés Robert Ransome en 1808. En Francia, en 1825, un herrero de Aisne, apellidado Fondueur, construye el primer arado metálico con juego delantero (Fig. 1.2). En la década de 1830 (algunos señalan 1837 más exactamente), el herrero estadounidense John Deere inventó la reja de acero para los arados. Después se inventó el arado de dos ruedas con asiento para el conductor, y más adelante el arado de discos (Fig. 1.3), que apareció en 1847 en Estados Unidos. En 1877 John Shearer and Sons construyó otro modelo de arado de discos que fue recibido con gran éxito en Australia. La llegada del tractor permitió aumentar la cantidad de órganos de los arados de discos y de vertederas, así como la velocidad de trabajo, lo que ha facilitado enormemente las tareas agrícolas.



**Fig. 1.2** Arado con rejas de hierro. (Singh, 2017)



En los países subdesarrollados, en las pequeñas parcelas, es muy común el uso de arados de manquera, como se denomina a los que empuñan con las manos, tirados por bueyes, aunque en las fincas mayores predominan los arados tirados por tractor.

El arado de discos es una máquina con la cual se efectúa la labranza primaria de la tierra. Se trata de un arado cuyos órganos de corte y volteo son discos en forma de casquete esférico que giran alrededor de ejes unidos al bastidor. Estos ejes forman un determinado ángulo con respecto a la dirección de avance, encontrándose también inclinados con respecto al plano horizontal. La tierra cortada por el disco lo presiona y lo hace girar. El disco entonces arrastra y eleva el suelo que, al alcanzar cierta altura, desvía la trayectoria de las partículas, que caen al fondo del surco provocando de esta manera el volteo. En algunos casos a los discos les antecede una pequeña vertedera que ayuda en el volteo de la tierra. La diferencia del arado de discos del arado grada (rastra), que también utiliza discos, es que en el primero cada disco tiene su propio eje.

Los arados de discos se usan preferentemente en condiciones en que los arados de rejas no pueden trabajar de manera satisfactoria. El arado de discos se utiliza más bien en suelos engramados y con raíces pesadas; en los suelos arcillosos y pegajosos; en tierras sueltas y en terrenos abrasivos. Sin embargo, el arado de disco no cubre los rastros tan eficientemente como el arado de rejas. Además, deja los campos desiguales. Esto exige más operaciones posteriores para arreglar la superficie, y para obtener una buena cama de siembra. Al mismo tiempo, estas operaciones adicionales causan daños considerables a la estructura de la capa arada. El elemento operativo de este arado es el disco. Durante la operación, el disco gira, debido a su posición inclinada respecto a la dirección de avance.



**Fig. 1.3** Arado de discos tipo estándar. (Anónimo, 2018)



### 1.3.1 Principales diseños y características de explotación de los arados de discos en el mundo.

Los arados de disco se pueden dividir en: arados de disco tipo estándar y arados de disco tipo vertical. Los primeros constan de cierto número de discos individuales, cada uno montado sobre el chasis por medio de un portadiscos. Los de tipo vertical tienen discos montados sobre un eje común, con los discos separados entre sí sobre el eje mediante carretes espaciadores. El cuerpo entero gira como una sola unidad, en forma similar a las rastras de discos. Debido a lo anterior, estos arados son a menudo llamados arados-rastras de discos. Además, se puede dividir, tanto los arados tipo estándar como los de tipo vertical, en arados de arrastre y arados integrales de montaje al tractor. Los arados de arrastre son de una sola vía y trabajan hacia la derecha. Los arados integrales pueden ser de una sola vía o de tipo reversible. Normalmente los arados son de tres, cuatro, cinco o más discos. (Berlijin, Manual para educación agropecuaria. Arados de discos, 1988, págs. 9, 10)

Clasificación de los arados de discos más comunes:

- Arados de discos de arrastre, de una sola vía, tipo estándar.
- Arados de discos de arrastre, de una sola vía, tipo vertical.
- Arados de discos integrales, de una sola vía, tipo estándar.
- Arados de discos integrales, de una sola vía, tipo vertical.
- Arados de discos integrales reversibles, tipo estándar.

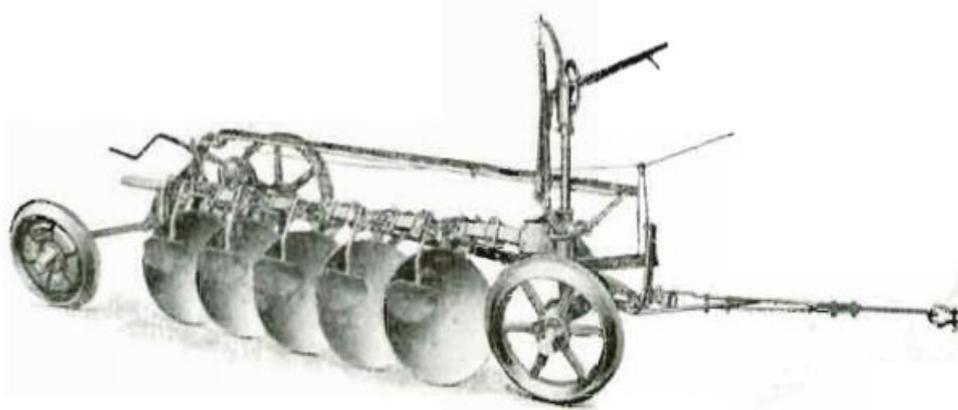
Para realizar un trabajo eficiente es esencial que tanto el arado como los discos se encuentren en un buen estado, y sean ajustados conforme a las exigencias del cultivo y a las condiciones del suelo. Para lograr una buena aradura con arados de discos, se debe tener conocimiento de lo siguiente:

- Rectificaciones de los discos, para reacondicionar los bordes cortantes después de que se gastan.
- Selección del tipo de disco conforme al tipo de suelo y a la profundidad de trabajo deseada.
- Ajustes de los discos y del arado.
- Enganche del arado al tractor.



### **Arado de disco tipo arrastre.**

Estos arados consisten en un cuerpo de discos soportado por tres ruedas y equipado con un sistema de enganche (Fig. 1.12).



**Fig. 1.4** Arado de discos tipo arrastre. (Risueño, 1964, pág. 3)

### **Construcción general:**

El cuerpo de estos arados normalmente contiene de tres a siete discos, cuyo diámetro varía entre 60 y 90 cm. Los discos van espaciados entre sí para cortar prismas de tierra con un ancho de 18 a 30 cm, según la profundidad de la aradura. El ancho de trabajo de estos arados varía entre unos 90 y 210 cm. El chasis o bastidor del cuerpo es soportado sobre tres ruedas: la rueda de surco, la rueda de campo y la rueda trasera. A diferencia de los arados de rejas, la rueda de surco está dirigida por la posición de la barra de tiro. Además, la rueda de campo está colocada más hacia la parte posterior del arado y forma, junto con la rueda trasera, el carro guía. En principio, sin embargo, no hay mucha diferencia entre la construcción de arados de los arados de rejas y la de los arados de discos. Mientras que en los arados de rejas las fuerzas laterales, son absorbidas por los talones y por la rueda trasera, el arado de discos depende para esta contrarresistencia únicamente de sus ruedas. Por eso, las ruedas de los arados de disco son más pesadas.

### **Arado integral de discos de una vía (fijo).**

Los arados integrales de discos difieren de los de tipo de arrastre en que aquellos son montados en el sistema de enganche en tres puntos del tractor (ver Fig. 1.5).





Fig. 1.5 Arado de discos de una vía. (2018)

### Construcción general:

Los arados integrales de discos constan de tres partes principales que son:

- El cuerpo de discos, que forma a su vez el bastidor o armadura del arado. Es la parte operativa del arado.
- El sistema de enganche mediante el cual se engancha el arado en el sistema de tres puntos del tractor.
- La rueda trasera, que sirve para contrarrestar las fuerzas laterales.

El cuerpo de discos es similar al de los arados de tipo arrastre y consta del bastidor, portadiscos y un número determinado de discos. Puede ser de tipo estándar o del tipo vertical. Normalmente, los arados integrales de discos de tipo estándar llevan tres o cuatro discos. En su parte delantera, el arado está equilibrado por un sistema de enganche. Consiste de un eje acodado con dos pernos para la conexión del arado en las dos barras inferiores de tiro del sistema de enganche del tractor. Además, cuenta con una torre para la conexión de la barra superior del sistema de enganche del tractor. Estos arados no están equipados con una rueda de surco como los arados de disco de tipo arrastre. A veces, tampoco llevan la rueda de campo. Las fuerzas laterales se contrarrestan únicamente mediante la rueda trasera. El funcionamiento del arado depende en gran medida del buen estado de esta rueda y de sus ajustes.

### Arado integral de discos de doble vía (reversible).

Estos arados pueden trabajar hacia la derecha, como los de una sola vía y también hacia la izquierda, quiere decir que pueden mover la tierra tanto a la derecha como a la izquierda. Aunque estos arados, al igual que los arados reversibles de rejas, pueden trabajar en ambos sentidos, su mecanismo de reversión es distinto al de los arados de rejas. Los



arados reversibles de rejas están equipados con un número de cuerpos izquierdos e igual número de cuerpos derechos. Los primeros mueven la tierra hacia la izquierda y los otros, hacia la derecha. (Berlijin, Manual para educación agropecuaria. Arados de discos, 1988, pág. 49)

Por el contrario, los arados de discos de doble vía (Fig. 1.6) emplean los mismos discos tanto para el trabajo hacia la izquierda como para la derecha. En este tipo de arado, lo único que cambia es el bastidor para colocarlos en la posición deseada. La simetría de los discos hace posible su trabajo hacia la izquierda y hacia la derecha. Por el contrario, el cuerpo de los arados de rejas no es simétrico, por eso se utiliza en un solo sentido.



Fig. 1.6 Arado de discos de doble vía. (2018)

#### Partes principales del arado:

El arado de discos de doble vía tiene una construcción enteramente simétrica. Consta de las siguientes partes principales:

- Armadura, en forma triangular simétrica, incluyendo el sistema de enganche al tractor y el apoyo.
- Cuerpo de discos. Incluye el bastidor, los portadiscos y los discos. Tiene, además, un mecanismo para cambiar la inclinación de los discos respecto al plano horizontal, desde una inclinación hacia la derecha hasta una misma inclinación hacia la izquierda con respecto al bastidor.
- Rueda guía o rueda trasera, que igualmente tiene una posición izquierda y otra derecha respecto del eje central del arado y de la dirección de avance.<sup>1</sup>
- Sistema hidráulico.

<sup>1</sup> (Berlijin, Manual para educación agropecuaria. Arados de discos, 1988)



## 1.4 Métodos de aradura con arados de discos.

El arado es uno de los implementos agrícolas más antiguos. Los modelos más comunes son: de cincel, de vertedera y de discos. Los arados fracturan la capa superficial del suelo, produciendo un surco; el conjunto de surcos sucesivos en un terreno, constituyen la tierra labrada o roturada

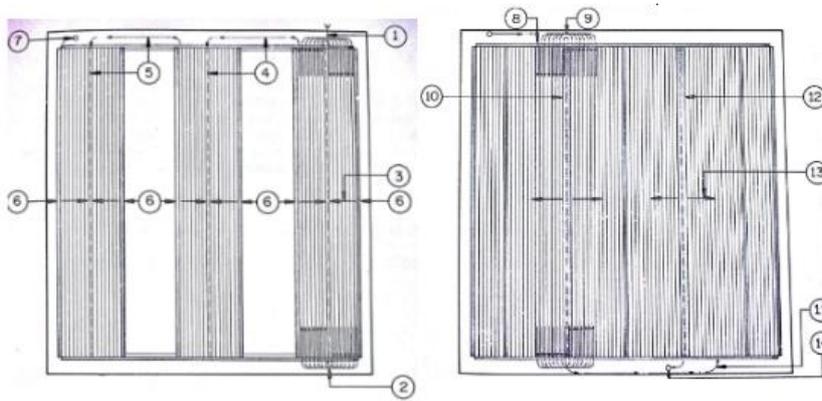
### 1.4.1 Métodos de aradura del arado de discos fijo.

#### Aradura en melgas

El método de la aradura en melgas (Fig. 1.7) consiste en dividir el terreno en un número de campos rectangulares. Los últimos se llaman melgas. Luego, se ara melga por melga. El método solo se emplea en el caso de arados de una sola vía. Para arados reversibles, no es necesario dividir el terreno en melgas. Pero cuando se usa un arado de una sola vía, se deben considerar las pérdidas de tiempo durante los viajes en vacío sobre la cabecera del campo. Cada vez que el tractor y el arado han trazado un surco, viajan en vacío sobre la cabecera una distancia promedio igual a la mitad del ancho de la melga. Por consiguiente, la pérdida de tiempo a causa de los viajes será mayor cuando la melga sea más corta y cuando el ancho de la melga sea más grande. Por esto, se prefiere proyectar las melgas de tal manera que su longitud sea lo más larga posible. Sin embargo, esto no es siempre factible. Por ejemplo, en el caso de un terreno rectangular con una pendiente en la dirección del eje longitudinal del campo, se debe necesariamente proyectar las melgas a lo ancho con el objetivo de que los surcos queden perpendiculares respecto a la pendiente para evitar erosión del suelo.

La pérdida de tiempo por viaje en vacío será menor cuando el ancho de la melga sea relativamente chico. Pero la aradura de melgas con arados de una vía requiere la construcción de un contrasurco en el centro de la melga y un surco muerto entre melgas subsecuentes. Estos trabajos exigen también, un tiempo adicional. (Berlijin, Manual para educación agropecuaria. Métodos de Aradura, 1986, pág. 21)





**Fig. 1.7** Método de aradura en melgas. (Berlijin, *Manual para educación agropecuaria. Métodos de Aradura*, 1986, pág. 25)

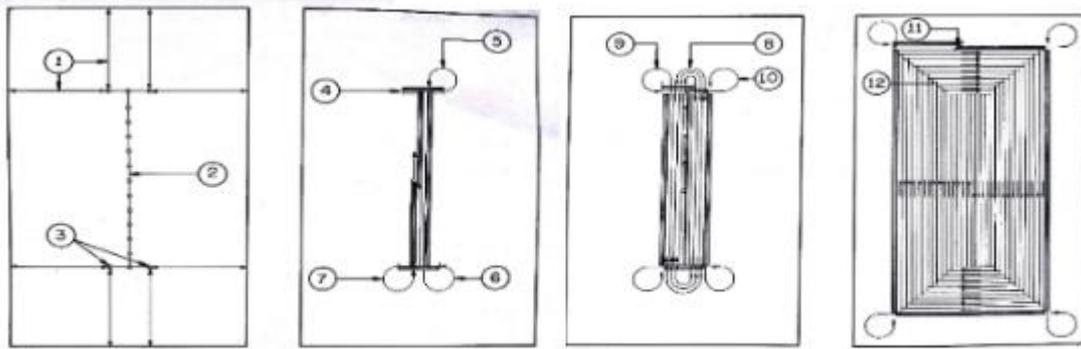
**Aradura en cuadrado** (Fig. 1.8):

Es otro método de aradura para los arados de una sola vía. En el empleo de este método no se necesita construir tantos surcos muertos y contrasurcos, a diferencia del método de aradura en melgas. El método consiste en proyectar un campo en escala más chica en el centro del terreno, de forma similar a la del terreno mismo. Después de arar este campo chico, el operador ara en cuadrado alrededor del mismo, dando vueltas en las esquinas en forma de lazo. Así se ara todo el terreno, sin cabeceras y hacia adentro.

El año siguiente se empieza a arar a lo largo de los bordes del terreno, desplazando la tierra hacia afuera. En este caso, no se pueden arar las diagonales simultáneamente. Estos se trabajan después como si fueran cabeceras, dejando un surco muerto en las diagonales del terreno.

Así es que durante un año se tiene sólo un surco a lo largo de los bordes del terreno. El otro año se tienen surcos muertos en las diagonales del terreno. Otra ventaja de este método de aradura es la marcha continua del tractor, así como la facilidad de dar vueltas en forma de lazo. Además, no se pierde tiempo por viajes en vacío. Pero la ventaja más importante es que casi no se pierde tiempo en efectuar las correcciones en terrenos de forma irregular. Esta se proyecta en escala reducida en el centro del terreno. Allí no es difícil realizarlas. El método de aradura en cuadro no es adecuado para terrenos con pendientes donde existe el peligro de erosión de los suelos. Porque, produce surcos en diversas direcciones. En otras palabras, no se pueden proyectar los surcos de manera que queden perpendiculares respecto a la pendiente. (Berlijin, *Manual para educación agropecuaria. Métodos de Aradura*, 1986, pág. 35)





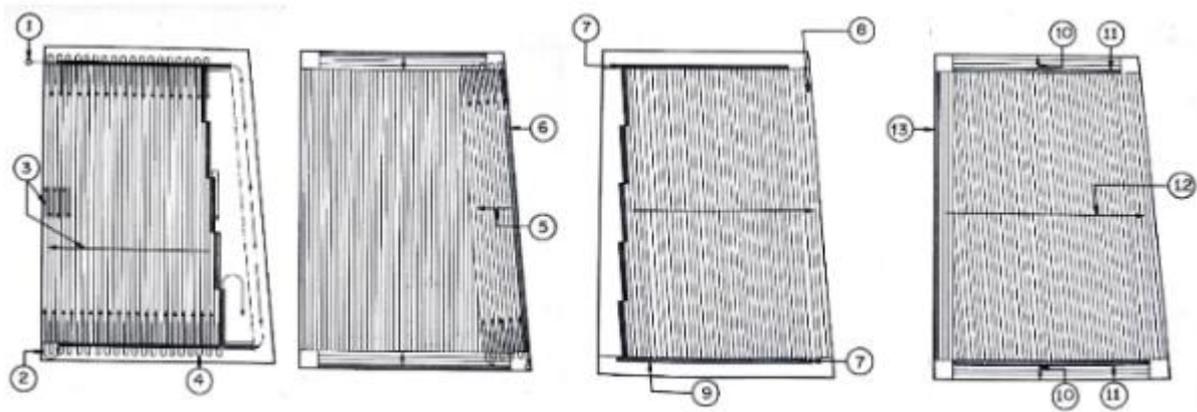
**Fig. 1.8** Método de aradura en cuadrado. (Berlijin, *Manual para educación agropecuaria. Métodos de Aradura*, 1986, pág. 37)

#### 1.4.2 Método de aradura del arado de discos reversibles.

La aradura con un arado reversible (Fig. 1.9) es más simple, porque no se necesita dividir el campo en melgas. Después de marcar las cabeceras, se empieza la aradura a lo largo de uno de los bordes más largos del terreno. Luego de haber dado la vuelta en la cabecera, el operador invierte el arado y emplea ahora el otro cuerpo del arado. De esta manera, se desplaza la tierra siempre en la misma dirección. Se desplaza la tierra de todo el campo hacia un lado. El siguiente año se empieza la aradura a lo largo del borde opuesto del campo, desplazando la capa arable hacia este lado. Una de las ventajas de la aradura con arado reversible es que no quedan surcos muertos en el campo. (Berlijin, *Manual para educación agropecuaria. Métodos de Aradura*, 1986, pág. 31)

Tampoco es necesario construir contrasurcos. En un año solo quedan surcos abiertos en tres lados del campo, en las líneas divisorias entre este mismo y las cabeceras. El siguiente año quedan surcos abiertos en tres bordes del terreno. Otra ventaja es que se da solo vueltas en las cabeceras. No se pierde tiempo por concepto de viajes en vacío sobre las cabeceras. Además, el arado reversible facilita considerablemente los trabajos de correcciones en campos con bordes no paralelos o irregulares. Por estas razones se prefiere el arado reversible particularmente para la aradura según curvas de nivel en terrenos ondulados o montañosos. El ajuste de arados reversibles es más complicado. En la ida se emplea un cuerpo derecho, en el regreso un cuerpo izquierdo. El ajuste debe ser preciso para que ambos cuerpos efectúen un mismo trabajo. Este se refiere a la profundidad de trabajo, al ancho de los panes de tierra, y a la forma de volcadura de la tierra.





**Fig. 1.9** Método de aradura con arado reversible. (Berlijin, *Manual para educación agropecuaria. Métodos de Aradura*, 1986, pág. 33)

El trabajo del arado reversible es ligeramente diferente del de arados de una sola vía. Los últimos voltean la tierra en la misma dirección de avance. Por esto los panes de tierra se cierran mejor.

En el caso de arados reversibles, se voltea el prisma de tierra en la ida de forma diferente que al regreso. Por consiguiente, la tierra de surcos sucesivos se pone en forma de espina de pescado. Especialmente en el caso de los suelos pesados con mucha cohesión, la tierra se queda abierta. Esto no es siempre una desventaja. Permite una aireación mejor, pero las malas hierbas no siempre se cubren adecuadamente

### 1.5. Arado fijo tubular AFT-4

#### Utilización

Se emplea en la roturación y cruce de todo tipo de suelos. Por su fuerte construcción puede ser utilizado en las condiciones más severas de trabajo, siendo muy eficaz en el volteo completo del prisma permitiendo así la aireación del suelo y la incorporación de gran cantidad de materia orgánica.

#### Características generales

El Arado Tubular Fijo AFT-4 puede trabajar con 4 ó 5 discos y está formado por un bastidor tubular hecho de dos piezas conformadas en frío y unidas mediante la soldadura lo cual le entrega una alta resistencia a los esfuerzos de flexión y torsión, posee un suplemento en el cual se soporta el quinto disco con las mismas características del bastidor y en él está acoplada la rueda de surco que posibilita la estabilidad en la marcha y en la elaboración de los surcos e interviene también en mantener la profundidad de trabajo, puede acoplarse indistintamente con tractores de II y III categorías en dependencia de la labor agrotécnica a realizar.



Sus órganos de trabajo son discos cóncavos lisos Ø 26” acoplados a un potente sistema de fijación y desplazamiento que incluye las cachimbas con portadiscos, estos últimos tienen definidos los ángulos de penetración y ataque lo cual le permite al arado realizar la labor agrotécnica que se necesita. Por su alto despeje en el bastidor este arado puede trabajar en suelos con restos de cosechas y malezas ya que logra una evacuación eficiente del volumen de tierra que mueve. Su mantenimiento es sencillo y rápido y a pedido se ofertan las piezas de repuesto principales, así como los servicios de Asistencia Técnica.

### **Características técnicas**

Modelo: AFT-4: Tipo: Integral; Discos: CL Ø 26 (660 mm); Profundidad de trabajo máxima: 250 mm; Angulo de penetración: 25°; Angulo de ataque: 48°; Distancia entre discos: 620 mm; Despeje del bastidor: 695 mm; Velocidad de trabajo: 6 km/h; Velocidad de transporte: 15 km/h. Con 4 discos: Tractor al cual se acopla: 100 — 120 hp; Peso máximo: 500 kg; Longitud: 2945 mm; Ancho: 1465 mm; Altura: 1390 mm; Cantidad de discos: 4; Peso por disco: 125 kg; Distancia entre discos: 620 mm; Despeje del bastidor: 695 mm; Ancho de labor: 1085 mm; Productividad: 1,5 ha/h. Con 5 discos: Tractor al cual se acopla: 120 — 130 hp; Peso máximo: 575 kg; Longitud: 3620 mm; Ancho: 1730 mm; Altura: 1530 mm; Cantidad de discos: 5; Peso por disco: 115 kg; Ancho de labor: 1345 mm; Productividad: 1,85 ha/h.

### **Recomendaciones**

Utilizar el tractor adecuado y que tenga en buen estado técnico la suspensión trasera y su sistema hidráulico. Mantener el equipo en un lugar seguro y protegido de las inclemencias del tiempo. Limpiar el equipo al finalizar el trabajo del día. Cumplir con el mantenimiento diario. No trabajar en suelos pedregosos ni con exceso de humedad. No trabajar en suelos con alto índice de enyerbamiento. Realizar las intervenciones de mantenimiento solo por el personal calificado para ello. Verificar la presencia de grasa en los puntos de engrase.

### **Principales conjuntos y piezas**

Cachimba con portadisco. Es el más importante de los conjuntos del arado ya que a él se acoplan los discos, que son los órganos de trabajo del arado. Este conjunto se atornilla al brazo para poder realizar su función. Está formado por dos piezas principales, la cachimba y el portadisco, además el retenedor, los rodamientos y otros elementos de



fijación. Tiene definido en su diseño los ángulos de ataque y penetración lo cual permite que los discos siempre estén dentro de la tierra y que el trabajo del arado sea estable.

Bastidor tubular. Es un fuerte y robusto conjunto soldado formado por dos piezas conformadas en frío y soldadas entre sí. Posee un suplemento, con las mismas características del bastidor que soporta el quinto disco, a los cuales están soldados los brazos a los que se acoplan las cachimbas con los portadiscos, también tiene las orejas de enganche inferior, la torre del tercer punto, el Soporte del Eje de la rueda y el alojamiento para el Apoyo.

Brazo de la rueda. Es un conjunto muy importante ya que a él se acoplan la rueda de surco y su mecanismo de regulación, mantiene la horizontalidad del arado acoplado con el tractor y permite la estabilidad de la marcha y de la profundidad de trabajo del mismo.

Soporte de la rueda. Es un conjunto soldado robusto y es muy importante en el trabajo estable del equipo. Sostiene al Brazo de la rueda de surco y al mecanismo para la regulación de los ángulos de trabajo de la misma con lo que se garantiza la profundidad adecuada y la estabilidad de la marcha del equipo en el plano horizontal.

Rueda de surco. Es la rueda que va dentro del surco, está situada en el lado derecho trasero del arado. Forma un conjunto con el Eje de la rueda lo que le permite realizar las regulaciones en la parte trasera del arado. Interviene en el control de la profundidad de trabajo, además posibilita la marcha estable longitudinal y transversal del arado.

Manivela. Es la encargada de elevar o descender la Rueda de surco en dependencia de la profundidad de labor que se quiera obtener haciendo girar la tuerca y mantiene la tensión del muelle.

Enganche. Es el conjunto de piezas para acoplar el arado al sistema de levante de tres puntos del tractor.

### **Mantenimiento**

El mantenimiento técnico diario es muy importante y necesario realizarlo antes de comenzar la jornada y al final de la misma para lograr una alta fiabilidad técnica en el equipo y alargar su vida útil. Teniendo en cuenta que este equipo es sencillo y que tiene órganos de trabajo que necesitan mantenerse bien apretados, limpios y bien ajustados, es necesario realizar las diferentes operaciones que permitan mantener altas su fiabilidad técnica, la capacidad de trabajo, así como su rendimiento agro-técnico.



## 1.6 Método de los Elementos Finitos.<sup>2</sup>

La idea general del método de los Elementos Finitos es la división de un medio continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del medio continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones algebraicas, lineales o no (Ponce de León González, 2015).

Cualquier ingeniero que haya trabajado con un programa de cálculo por elementos finitos para resolver algunos problemas de ingeniería, tiene una idea bastante exacta de lo que significa el planteamiento del párrafo anterior. Hasta puede ser capaz de crear su modelo de cálculo y ejecutar su variante obteniendo una posible solución del mismo. Uno de los problemas dónde radica el conocimiento en el cálculo por elementos finitos, es que muchos conocen como emplear algún programa de cálculo por elementos finitos, pero muy pocos conocen la teoría que sustenta los cálculos (Ponce de León González, 2015)..

Esto enmarca dos aspectos importantes a criterio del autor que son: como primer gran problema está el hecho de que los programas de cálculo están a disposición de casi todos los profesionales que lo necesiten, los que, habiendo entrenado un poco la forma operativa de preprocesamiento y ejecución obtendrán normalmente una respuesta del programa para la solución del modelo que se está ejecutando, siempre que no se hayan cometido errores en la esencia del problema al confeccionar el modelo o en las condiciones de frontera del mismo. El segundo gran problema es que el usuario normalmente da por buena la solución obtenida, pues como el cálculo por elementos finitos ha tenido en las últimas décadas un elevado auge en la solución de problemas de ingeniería, cómo puede estar mal una respuesta que se haya obtenido sobre la base de la corrida de un programa de esta categoría. (Ponce de León González, 2015).

Esta es la clave del problema, ya que, en esencia, la teoría del cálculo por elementos finitos tiene dos aspectos fundamentales, “la física del problema” y “la matemática necesaria para manipular y plantear en forma de modelos matemáticos el problema

---

<sup>2</sup> Ponce de León González G.R. (2015). “Estudio de la estructura portante de la sembradora de granos del municipio de Calixto García”.



físico”. Hay que hacerle comprender a los que estudian el método una teoría desarrollada desde los años 40 sobre la base de la Mecánica del Medio Continuo, implementada sobre modelos matemáticos que manipulan una teoría que no es común para los ingenieros, como son los métodos variacionales, los residuos ponderados, los principios de energía mínima, entre otros (Ponce de León González, 2015).

Al iniciar el proceso de cálculo de una estructura el ingeniero debe formular un esquema de cálculo para la misma, en otras palabras, un modelo de cálculo en el que la estructura es idealizada de manera que pueda ser analizada (Fig. 1.10). Esto se debe en esencia a que el método de los elementos finitos supone, para solucionar el problema, el dominio discretizado en subdominios denominados elementos, de forma que el dominio total en estudio se aproxime mediante el conjunto de elementos en que se subdivide. Los elementos se definen por un número discreto de puntos, llamados nodos, que los conectan entre sí. Sobre estos nodos se materializan las variables de salida fundamentales del problema (Ponce de León González, 2015).

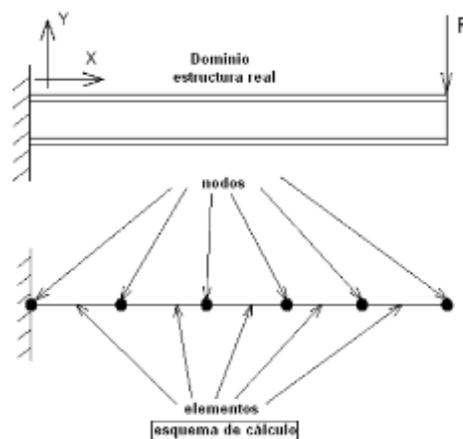


Fig. 1.10 Estructura real y esquema de cálculo.

En el caso de elementos estructurales estas variables de salida fundamentales son los desplazamientos nodales, ya que a partir de éstos se pueden calcular el resto de las variables de salida que sean de interés. Estas variables de salida se definen en la dirección de los grados de libertad de cada nodo del modelo. Los grados de libertad de un nodo son las variables que determinan el estado del nodo (Ponce de León González, 2015).

El sistema, debido a las condiciones de contorno, en este caso (Fig. 1.10) empotramiento y fuerza concentrada en el otro extremo de la viga, evoluciona hasta un estado final. En



este estado final, conocidos los valores de los grados de libertad de los nodos del sistema, se puede determinar cualquier otra variable de salida o incógnita deseada, como las fuerzas, tensiones, deformaciones, etc. (Ponce de León González, 2015).

Considere también que el análisis estructural probablemente es la aplicación más común del método de los elementos finitos. El término estructural (o estructura) no sólo aplica para las estructuras de la ingeniería civil, como los puentes y edificios, sino también en las estructuras navales, aeronáuticas, y mecánicas como el casco de una nave, estructuras de aviones, bastidor de las máquinas, así como componentes mecánicos tales como pistones, partes de máquinas y herramientas (Ponce de León González, 2015).

Según (Ponce de León González, 2015), los problemas de análisis estructurales están gobernados por:

- Ecuaciones de equilibrio.
- Relaciones de compatibilidad, o relaciones deformaciones-desplazamientos.
- Características del material o relaciones tensiones-deformaciones.

Las estructuras construidas por elementos cuyas conexiones son discretas debido a la geometría de la misma, tales como las armaduras cuyas conexiones son articuladas y los pórticos cuyas conexiones son rígidas, presentan menor dificultad en el proceso de ensamblaje de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del sistema, que aquellas en que la subdivisión de los elementos es artificial en relación con la estructura real, tales como elementos con planchas y sólidos (Ponce de León González, 2015)..

El método de los Elementos Finitos ha demostrado las amplias posibilidades que posee como herramienta para la solución de problemas de ingeniería y para el análisis de problemas de investigación. Como resultado de ello su empleo tiene una gran difusión en la comunidad de ingenieros, tanto en centros de estudio como en centros de investigación y en empresas de producción (Ponce de León González, 2015)..

### **Fundamentos del Método de los Elementos Finitos.**

Se trata de un método general para la solución de problemas de contorno gobernados por ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales. En esencia se trata de una técnica que sustituye el problema diferencial por otro algebraico, aproximadamente equivalente, para el cual se conocen técnicas generales de resolución. Para ello hace uso de la



"discretización" o subdivisión de una región sobre la cual están definidas las ecuaciones en formas geométricas simples denominadas elementos finitos. Las propiedades, materiales y relaciones gobernantes en estos elementos se expresan en función de los valores desconocidos en las "esquinas" de los elementos o nodos (ver Fig. 4). Una de las ventajas de este método es su facilidad de implementación en un programa computacional, que a su vez es una condición básica para su utilización ya que para el tratamiento de un problema en particular debe efectuarse un número muy elevado de operaciones para resolver sistemas algebraicos del orden de cientos o miles de ecuaciones. No obstante, esta cantidad no es una limitación con las computadoras actuales. Las ideas básicas de este método se originaron en avances en el análisis estructural de la industria aeronáutica en la década del '50 del siglo XX. En la década del '60 del mismo siglo el método fue generalizado para la solución aproximada de problemas de análisis de tensión, flujo de fluidos y transferencia de calor (*Ponce de León González, 2015*).

El primer libro sobre elementos finitos fue publicado en 1967 por Zienkiewicz y Cheung. En la década del '70 del siglo pasado el método fue extendido al análisis de problemas no lineales de la mecánica del continuo. Hoy el método permite resolver prácticamente cualquier situación física que pueda formularse mediante un sistema de ecuaciones diferenciales. En sus principios el método de los elementos finitos no llegó masivamente a la práctica de la ingeniería debido a la no disponibilidad de computadoras en los estudios de ingeniería y por el otro al requisito de conocimientos profundos no solamente de la técnica y de los modelos matemáticos pertinentes sino también de programación computacional. Actualmente, la situación es completamente diferente, ya que las modernas computadoras personales soportan sin inconvenientes poderosos programas de propósito general de fácil utilización (*Ponce de León González, 2015*).

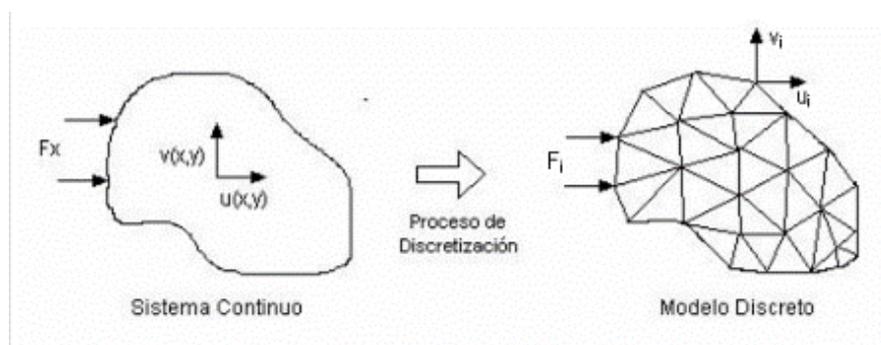


Fig. 1.11. (Fuente: citado por [25]).



El proceso de análisis de un problema físico mediante elementos finitos se muestra en la Fig. 1.11. La geometría puede ser definida por el analista o creada a partir de algún programa CAD. El segundo paso consiste en definir el modelo matemático a resolver. Este es el paso fundamental donde se especifica el tipo de ecuaciones a determinar, las condiciones de borde, propiedades de los materiales, y otros detalles acerca del método en sí mismo. Una vez efectuada dicha definición el programa resuelve automáticamente las ecuaciones pertinentes y provee los resultados en una forma apropiada para el analista.

### 1.6.1 Software para la obtención del modelo (SolidWorks).

El software de automatización de diseño mecánico SolidWorks es una herramienta de diseño de modelado sólido paramétrica y basada en operaciones que aprovecha la facilidad de aprendizaje de la interfaz gráfica de usuario de Windows™. Puede crear modelos sólidos tridimensionales totalmente asociativos con o sin restricciones mientras utiliza al mismo tiempo las relaciones automáticas o definidas por el usuario para capturar la intención del diseño (*Ponce de León González, 2015*).

#### Basado en operaciones.

Del mismo modo que un ensamblaje está compuesto por una serie de piezas individuales, un modelo de SolidWorks también está compuesto por elementos individuales. Dichos elementos se denominan operaciones [19].

Cuando usted crea un modelo mediante el software SolidWorks, trabaja con operaciones geométricas inteligentes y fáciles de entender, como salientes, cortes, taladros, nervios, redondeos, chaflanes y ángulos de salida. A medida que se crean estas operaciones, las mismas se aplican directamente a la pieza con la que está trabajando [19].

Según [19], las operaciones se pueden clasificar como croquizadas o aplicadas.

- ✓ **Operaciones croquizadas:** las que se basan en un croquis en 2D. Generalmente, ese croquis se transforma en un sólido mediante extrusión, rotación, barrido o recubrimiento.
- ✓ **Operaciones aplicadas:** las que se crean directamente en el modelo sólido. Los redondeos y los chaflanes son ejemplos de este tipo de operación.

El software de SolidWorks muestra gráficamente la estructura basada en operaciones del modelo en una ventana especial denominada Gestor de diseño del



FeatureManager®. El gestor de diseño no sólo muestra la secuencia en la que se han creado las operaciones, sino que también le facilita el acceso a toda la información relacionada subyacente (*Ponce de León González, 2015*).

### **Paramétrico.**

Las cotas y las relaciones utilizadas para crear una operación se capturan y se almacenan en el modelo. Gracias a ello, no sólo es posible la captura de la intención del diseño, sino que también se pueden realizar de manera rápida y sencilla cambios en el modelo (*Ponce de León González, 2015*).

- ✓ **Cuotas conductoras:** cotas utilizadas al crear una operación. Incluyen las cotas relacionadas con la geometría de croquis, así como las relacionadas con la operación en sí.
- ✓ **Relaciones:** incluyen información del tipo paralelismo, tangencia y concetricidad. Históricamente, este tipo de información se ha comunicado en los dibujos a través de los símbolos de control de las operaciones. Capturando esto en el croquis, SolidWorks le permite capturar totalmente la intención del diseño directamente en el modelo.

### **Modelado sólido.**

Un modelo sólido es el tipo más completo de modelo geométrico utilizado en los sistemas de CAD. Contiene toda la geometría de superficie y alámbrica necesaria para describir detalladamente las aristas y las caras del modelo. Además de la información geométrica, contiene toda la información denominada topológica que interrelaciona la geometría. Un ejemplo de información topológica sería qué caras (superficies) se encuentran en qué arista (curva). La inteligencia hace que funciones como el redondeo resulten tan fáciles como seleccionar una arista y especificar un radio (*Ponce de León González, 2015*).

### **Totalmente asociativo.**

Un modelo de SolidWorks es totalmente asociativo a los dibujos y ensamblajes a los que hace referencia. Los cambios efectuados en el modelo se reflejan automáticamente en los dibujos y ensamblajes relacionados. De un modo similar, puede efectuar modificaciones en el contexto del dibujo o del ensamblaje y tener la certeza de que esas modificaciones se reflejarán en el modelo (*Ponce de León González, 2015*).



## **Restricciones.**

Las relaciones geométricas paralelas, perpendiculares, horizontales, verticales, concéntricas y coincidentes son tan sólo algunas de las restricciones que SolidWorks admite. Además, se pueden utilizar ecuaciones para establecer relaciones matemáticas entre los parámetros. Mediante las restricciones y las ecuaciones, puede garantizar que se capturen y se mantengan los conceptos del diseño, como los taladros o los radios iguales (*Ponce de León González, 2015*).

## **Ensamblaje ascendente.**

Los ensamblajes ascendentes se crean agregando y orientando piezas existentes en un ensamblaje. Las piezas agregadas al ensamblaje aparecen como Piezas de componente. Las piezas de componente se orientan y posicionan en el ensamblaje mediante las Relaciones de posición. Las relaciones de posición relacionan caras y aristas de piezas de componentes con planos y otras caras/aristas (*Ponce de León González, 2015*).

## **Análisis del ensamble.**

Hay diversos tipos de análisis que pueden realizarse en un ensamblaje. Entre ellos se incluyen el cálculo de las propiedades físicas del ensamblaje y la verificación de interferencias [19].

### **1.6.2 Análisis con el empleo del software SolidWorks/Simulation.**

El SolidWorks, es el paquete de modelado geométrico más popular en el diseño mecánico hoy en día, además de ser uno de los más completos aplicado en la rama de la mecánica. Reconocidas firmas en el mundo lo utilizan. De ahí el hecho de ser una potente herramienta para el diseño paramétrico. Se considera que este software junto a los otros es capaz de aumentar el rendimiento del diseño (comparado con el AutoCAD) hasta en un 40% [32]. En encuestas realizadas a más de 21 000 usuarios CAD se puede apreciar la aceptación del software.

Este ha sido un programa que por sus cualidades, comparadas con otros sistemas del mismo rango, se ha diseminado en la mayoría de las industrias y universidades del país con gran aceptación entre los usuarios, de fácil instalación. Se puede trabajar en máquinas de hasta 512 Mb de memoria RAM. En la versión 2014 tiene acoplado un



paquete de cálculos por elementos finitos (Simulation), 2014 por lo que no existe la necesidad de emigrar a otro software para analizar los modelos.

El sistema de análisis por elementos finitos Simulation es un sistema de análisis interactivo con interface en línea al Sistema CAD SolidWorks. Permite la importación y exportación de modelos geométricos de otros sistemas CAD, así como la importación y exportación de modelos FEA desde y hacia otros paquetes de análisis por Elementos Finitos. Tiene un generador de malla y un pre y postprocesador de elementos finitos. Forma parte de una familia amplia de paquetes de análisis a partir del paquete matriz de Cosmos M, derivados a partir de la complementación de este con paquetes CAD para aprovechar las ventajas de estos paquetes gráficos en el diseño de elementos y conjuntos mecánicos.

El MEF es una técnica numérica para analizar los diseños en ingeniería, se acepta como el método de análisis estándar debido a su generalidad y conveniencia para la aplicación en la computadora. En el MEF se divide al modelo en muchos pedazos pequeños de formas simples llamados elementos (los así llamados elementos finitos) que reemplazan un problema complejo eficazmente por muchos problemas simples que necesitan ser resueltos simultáneamente. Los elementos se unen a través de puntos llamados nodos. El proceso de dividir el modelo en partes pequeñas se llama mallado. El comportamiento de cada elemento es conocido bajo diferentes condiciones de borde. El Método de los Elementos Finitos usa diferentes tipos de elementos. La respuesta en cualquier punto en un elemento se interpola a partir de la respuesta en los nodos del elemento. Cada nodo se describe totalmente por varios parámetros que dependen del tipo del análisis y el elemento que se usó. Por ejemplo, la temperatura de un nodo describe su respuesta totalmente en el análisis térmico. Para los análisis estructurales, la respuesta de un nodo se describe, en general, por tres traslaciones y tres rotaciones (*Ponce de León González, 2015*).

### **1.6.3 Análisis de diseño.**

#### **Antecedentes.**

Durante los inicios de la década de los 90, el proceso de desarrollo de productos empezó a evolucionar de un método de prototipo-prueba a un nuevo paradigma de desarrollo de productos mediante la tecnología del diseño asistido por computadora (CAD). En vez de incurrir en los costos y retrasos relacionados con la construcción y realización de pruebas



de prototipos, los ingenieros empezaron a analizar modelos informáticos del diseño en cuestión mediante el método de análisis de elementos finitos (FEA) (*Ponce de León González, 2015*).

El análisis del diseño con FEA es una tecnología de software que los ingenieros utilizan para simular el comportamiento físico de un diseño en condiciones de funcionamiento específicas. En el FEA se divide un sólido en "elementos" geométricos, que se representan matemáticamente en la computadora como una malla en 3D que se superpone sobre el sólido y lo impregna, para resolver las ecuaciones diferenciales que rigen los fenómenos físicos tal como se aplican a las geometrías simuladas. Con la utilización de FEA, los ingenieros simulan las respuestas de los diseños ante las fuerzas de funcionamiento y utilizan estos resultados para mejorar el rendimiento del diseño, minimizando la necesidad de prototipos físicos (*Ponce de León González, 2015*).

### **Combinación potente.**

El software de análisis de diseño completamente integrado con el software de modelado en 3D, les permite ahora a los ingenieros probar un diseño en la computadora en vez de utilizar iteraciones de prototipo-prueba. Los modelos de CAD se han convertido en prototipos virtuales y el análisis del diseño ha sustituido las pruebas físicas, con lo que se consigue un desarrollo del producto más rápido, menos costoso y más optimizado. Además, el análisis virtual del diseño permite realizar un test más exhaustivo del rendimiento de dicho producto del que sería posible aunque se utilizaran los prototipos más detallados, con lo que se obtienen productos más innovadores, fiables y comercializables.

### **Análisis de diseño.**

En términos sencillos, el análisis del diseño es una potente tecnología de software para la simulación del comportamiento físico de un futuro producto en la computadora. ¿Se romperá? ¿Se deformará? ¿Se calentará demasiado? Éstos son los tipos de preguntas a las que el análisis del diseño ofrece respuestas precisas. En vez de construir un prototipo y desarrollar elaborados regímenes de pruebas para analizar el comportamiento físico de un producto, los ingenieros pueden obtener esta información de manera rápida y precisa. Puesto que el análisis del diseño puede minimizar o incluso eliminar la necesidad de crear prototipos físicos y realizar pruebas, esta tecnología se ha estandarizado en el sector de la fabricación durante la última década y se ha convertido



en una valiosa herramienta de desarrollo de productos que está presente en casi todos los campos de la ingeniería.

El análisis del diseño emplea el método de análisis de elementos finitos (FEA) para simular el comportamiento físico del diseño de un producto. El proceso de análisis de elementos finitos (FEA) consiste en subdividir todos los sistemas en componentes individuales o "elementos" cuyo comportamiento es de fácil comprensión y, a continuación, reconstruir el sistema original a partir de estos componentes. Se trata de una manera natural de realizar análisis en ingeniería e incluso en otros campos analíticos.

En el campo de la ingeniería mecánica, el análisis del diseño puede resolver una amplia gama de problemas relativos al desarrollo de productos. Los ingenieros pueden utilizar el análisis del diseño para predecir el comportamiento físico de casi cualquier pieza o ensamble en todas las condiciones de carga: desde una sencilla viga bajo una carga de flexión hasta simulaciones de accidentes de tráfico y el análisis de las vibraciones de un avión. El verdadero poder del análisis del diseño consiste en la capacidad de realizar cualquiera de estos tipos de estudios de manera precisa sin necesidad de construir nada. Todo lo que se necesita es un modelo CAD (*Ponce de León González, 2015*).

La aplicación de análisis del diseño más habitual en el campo de la ingeniería mecánica es el análisis de tensiones. Los ingenieros estudian las tensiones (tanto estructurales como térmicas) de una pieza para determinar si fallará o no y si es necesario realizar modificaciones en el diseño para superar problemas potenciales. El análisis del diseño también se utiliza para determinar el potencial de deformación de las piezas, las frecuencias de resonancia y los modos de vibración de piezas y ensambles, las respuestas dinámicas y sísmicas, las tensiones de contacto y la distribución de la temperatura, para nombrar algunas utilidades; así como también se utiliza para analizar el flujo de los fluidos, tanto si se trata de un gas o un líquido en una tubería, como la mezcla de aire y combustible del colector de admisión de un motor o bien el plástico en estado líquido para rellenar un molde.

Un ejemplo sencillo de cómo se puede utilizar el análisis de diseño es a través de la siguiente pieza (soporte). No teniéndola seguridad de que el soporte sea lo suficientemente fuerte como para aguantar las cargas de servicio sin sufrir deformaciones y tensiones excesivas. Por lo que necesitamos respuestas de manera



rápida y económica. El análisis del diseño puede proporcionarnos estas respuestas utilizando simplemente nuestro modelo CAD original y un paquete de análisis.

Con un sistema de análisis del diseño integrado, podemos realizar el análisis directamente en nuestro modelo en 3D, sin salir en ningún momento de nuestro paquete CAD. Una vez que tenemos nuestra geometría, podemos configurar el modelo, realizar el análisis y analizar los resultados en un par de pasos (*Ponce de León González, 2015*).

### **Paso 1.**

Primero, define y asigna las propiedades a los materiales del modelo.

### **Paso 2.**

A continuación, se aplican las cargas y las restricciones que representan las condiciones de carga de la vida real.

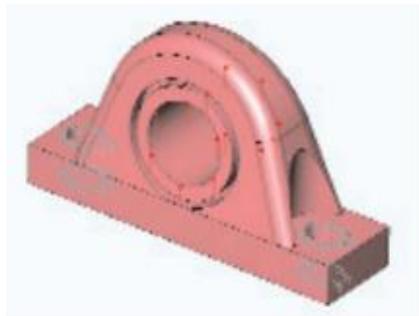


Fig. 1.12. Aplicación de cargas a la pieza (Fuente: citado por *Ponce de León González, 2015*).

### **Paso 3.**

Ahora, se genera el mallado de la geometría. El análisis del diseño utiliza los elementos finitos para calcular la respuesta del modelo a las condiciones de cargas iniciales. El mallado se realiza automáticamente con poca, si es que se necesita, intervención del usuario.



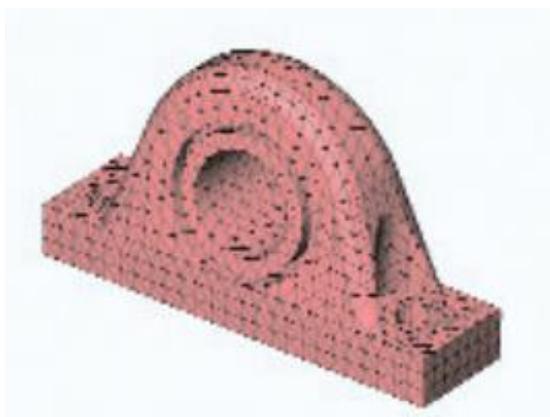


Fig. 1.13. Mallado de la pieza (Fuente: citado por (Ponce de León González, 2015).

#### **Paso 4.**

Después de generar la malla del modelo, se lleva a cabo la solución del análisis. Este paso está completamente automatizado y no es necesaria la intervención del usuario.

#### **Paso 5.**

Una vez que la solución está completa, podemos analizar los resultados. Por supuesto, éstos dependen del tipo de análisis realizado. Se puede estudiar las desviaciones y tensiones. También es posible utilizar el análisis del diseño para evaluar las frecuencias de resonancia, la distribución de la temperatura o la respuesta estructural a las cargas dinámicas.

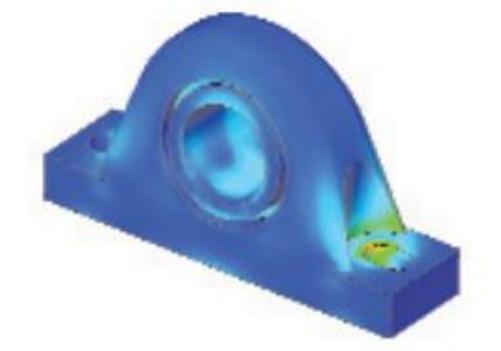


Fig. 1.14. Resultados del análisis (Fuente: citado por (Ponce de León González, 2015).

Los resultados del análisis verificarán la función del nuestro diseño o bien mostrarán dónde existen problemas que requieran modificaciones para conseguir la calidad, el nivel de tensión y la frecuencia natural necesarias, etc. Con los paquetes de análisis integrados, se pueden realizar fácilmente modificaciones en el diseño en el mismo modelo de CAD que se utilizó para el análisis inicial.



## **CAPÍTULO II. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA EL CÁLCULO DEL ESTADO TENSIONAL-DEFORMACIONAL DEL SOPORTE SOLDADO DE LOS RODAMIENTOS DEL ARADO AFT-4.**

### **2.1 Introducción al capítulo.**

En el presente capítulo se modelará el prototipo en 3D del soporte soldado de los rodamientos del arado AFT-4, para someterlo a un estudio estático, con el objetivo de la evaluación del estado tensional-deformacional del mismo. Para esto se tuvieron en cuenta varios aspectos: como la caracterización de los materiales, la determinación de las fuerzas actuantes en él, las restricciones del modelo y la generación correcta del mallado.

### **2.2 Soporte soldado de los rodamientos del arado de disco AFT-4.**

El soporte del disco del arado AFT-4 (Anexo 2) es el más importante de los conjuntos del arado porque a él se acoplan los discos. Este conjunto se atornilla al brazo que lo fija al bastidor del implemento. En el Anexo 1 se muestra un despiece del conjunto.

El conjunto está formado por el portadisco y el soporte soldado, dos rodamientos cónicos, uno mayor (NKF 32212) y uno menor (NKF 32209) cada uno de ellos con su sello para evitar la entrada de polvo; el eje, donde se montan los rodamientos; la tapa o guardapolvo, con extremo roscado, terminado con una cabeza de tornillo para apriete del casquete a fin de hermetizarlo y evitar la entrada de tierra y polvo hacia el soporte. El soporte tiene un extremo roscado para acoplar con la tapa y el otro extremo tiene soldado un disco, con orificios, que sirve de acoplamiento al brazo que lo fija al bastidor. La porta disco tiene cuatro orificios para fijar el disco con tornillos. El soporte se fija al brazo que lo sostiene mediante cordones de soldadura. Esta unión soldada soporta un estado tensional-deformacional debido al trabajo del disco. El agrietamiento frecuente de esta unión soldada constituye el objeto de la presente investigación.

Por su alto despeje en el bastidor el arado AFT-4 (ver Anexo 1) se podría pensar en que puede trabajar en suelos con restos de cosechas y malezas ya que logra una evacuación eficiente del volumen de tierra que mueve. Sin embargo, para trabajar en suelo con rastros se someten los discos a un trabajo más severo y crecen las tensiones y las vibraciones.

Se hicieron observaciones del laboreo y entrevistas tanto a agricultores como a técnicos en mecanización, usuarios del arado de discos en estudio. Coincidieron en que este



apero sufre roturas con frecuencia, de distintas piezas, pero fundamentalmente del soporte soldado del rodamiento y del cubo del disco. Señalan que fundamentalmente se producen por agrietamiento de la soldadura del soporte.

En las investigaciones realizadas se evidenció de que el personal que opera estos implementos no conocen sus características y no realizan las buenas prácticas de laboreo, lo cual complica las condiciones de trabajo, de por sí severas que se deben enfrentar. El resultado es un crecimiento de las tensiones sobre los conjuntos y subconjuntos del implemento y en particular del soporte donde se encuentra la unión soldada.

### **2.3. Análisis de la fractura del soporte**

La unión soldada entre el soporte y el brazo que lo sostiene de acoplamiento sufre las tensiones que surgen por el trabajo del disco y la reacción vertical del terreno. Se fractura con grietas semicirculares debido a la forma de la sección de las planchas que conforman el brazo y el núcleo del soporte. (Anexo 3).

El soporte soldado de los rodamientos ha sufrido roturas durante la explotación del arado AFT-4. El fallo de la pieza se produce en la zona de la soldadura donde se unen el núcleo y las planchas que sirven de soporte al mismo. Debido a la configuración geométrica circular del núcleo del soporte de los rodamientos, en la zona donde se produce el fallo de la pieza crece una grieta de forma semicircular. Al realizar la inspección visual de la rotura se apreció que la misma presentaba las características típicas del fallo por fatiga, o sea, se observó la presencia de un defecto inicial a partir del cual se desarrolló la grieta.

Las causas de la nucleación y posterior crecimiento de la grieta, de acuerdo a los criterios de este autor, se deben a tres causas: la concentración de tensiones que ocurre en los cambios de sección en el cordón de soldadura, la disminución de tenacidad y la presencia de defectos en la ZAT y la acción de las cargas variables en el tiempo.

El mejor control del mantenimiento del implemento constituye un factor esencial en la disminución de pérdidas y en el aumento de la vida útil del equipo.

### **2.4. Definición del modelo geométrico.**

Para determinar la definición del modelo geométrico, se realizó una visita en el lugar donde se encuentra el arado, con el objetivo de elaborar el croquis del soporte soldado de los rodamientos y obtener todas las dimensiones necesarias. Esta información se usó después para modelar el prototipo con la ayuda del software SolidWorks 2016 (ver Fig. 2.1).



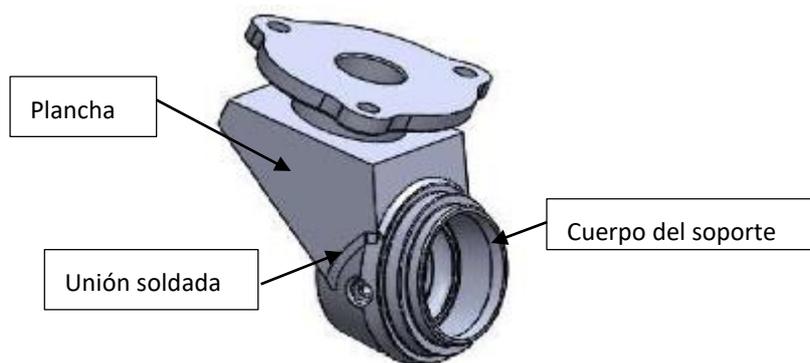


Fig. 2.1. Modelo geométrico del soporte soldado de los rodamientos.

## 2.5. Caracterización de los materiales.

En nuestro país se está utilizando el acero AISI 1015 en la construcción de diferentes implementos agrícolas. Entre las distintas partes que componen estos implementos aparecen uniones soldadas que durante su funcionamiento pueden verse solicitadas por cargas cíclicas.

El acero AISI 1015, es un acero de construcción con una buena soldabilidad metalúrgica, operatoria y constructiva (Guliaév, 1978).

En las tablas 2.1 y 2.2 se muestran la composición química y las propiedades físicas y mecánicas de este acero según la bibliografía consultada y las mediciones realizadas.

Para comprobar que el material utilizado en los experimentos fuera el acero AISI 1015 se realizó el análisis químico de una muestra cuadrada de 5 cm de lado y 4 mm de espesor extraída del material base. El análisis se realizó en el Cuantómetro ARL 3460 ubicado en el laboratorio instrumental de la Empresa ACINOX-Tunas. Atendiendo al porcentaje de cada elemento de aleación presente en la muestra es posible corroborar que se trata del acero AISI 1015.

Tabla 2.1. Composición química del acero AISI 1015. Fuente: [www.matweb.com](http://www.matweb.com).

Composición:	Elementos				
	%C	%Mn	%Si	%S	%P
Típica	0,13- 0,18	0,30 – 0,60	0,17 – 0,37	≤0,05	≤0,04
Medida	0,16609	0,50421	0,02746	0,00578	0,01385

En la tabla 2.2 aparecen los valores de un grupo de propiedades físicas y mecánicas del acero en cuestión.

Tabla 2.2. Propiedades físicas y mecánicas del acero AISI 1015. Fuente: [www.matweb.com](http://www.matweb.com).



Propiedades								
Propiedad	$\sigma_B$ (MPa)	$\sigma_f$ (MPa)	$\sigma_{-1}$ (MPa)	$\mu$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (1/°C)	$\delta$ (%)	$\psi$ (%)
Típica	420	315	230	0,29	7870	$119 \times 10^{-7}$	39	61
Medida	411	309						

La nomenclatura utilizada en la tabla 2.2 es la siguiente:

$\sigma_B$ : Límite de resistencia, límite de rotura.

$\sigma_f$ : Límite de fluencia.

$\sigma_{-1}$ : Límite de resistencia a la fatiga.

$\mu$ : Coeficiente de Poisson.

$\rho$ : Densidad.

$\alpha$ : Coeficiente de dilatación térmica.

$\delta$ : Alargamiento relativo.

$\psi$ : Extricción.

Se determinó la dureza del material base mediante el ensayo Rockwell, empleando un durómetro TK-14-250, fabricado en la antigua Unión Soviética, en el año 1982. El mismo se encuentra ubicado en el laboratorio de metalografía de la Universidad de Holguín. Se realizaron tres mediciones que se promediaron para obtener la dureza del material. Los resultados de estas mediciones se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Dureza del material base.

Medición (HRB)			Promedio
1	2	3	
70,5	70,5	71	70,67

### Material base para la fabricación de las probetas

De acuerdo a que en esta tesis se estudió el fallo por fatiga del soporte soldado, en el que el material base utilizado para su fabricación es el acero AISI 1015, se utilizó ese mismo material para fabricar las probetas que permitan caracterizar a la unión. Este acero se clasifica como un acero hipoeutectoide, con alto contenido en ferrita y poca perlita, por lo que se caracteriza con una alta plasticidad y excelente soldabilidad y además también se usa para piezas a cementar. Debido a su muy bajo contenido de carbono, al elevarse la temperatura y luego enfriarse con cierta rapidez no se producen



prácticamente fases duras, lo que lo convierte en muy conveniente para piezas que han de ser soldadas. Por su composición de fases se hace muy conveniente por su elevada resistencia a la fatiga al no presentar inclusiones y fases concentradoras de tensiones. Por su alta soldabilidad y resistencia a la fatiga, combinada con una relativamente satisfactoria resistencia mecánica es idóneo para la construcción del soporte. En resumen, el acero AISI 1015<sup>3</sup>, es un acero estructural, de construcción, con una buena soldabilidad metalúrgica, operatoria y constructiva y suficiente resistencia mecánica y excelente tenacidad y resistencia a la fatiga.

## 2.6. Cálculo de la fuerza de tracción que demanda el arado AFT-4

La fuerza de tracción  $P_t$  que demanda el arado AFT-4 para realizar la aradura de la tierra se obtuvo según la fórmula racional de Goriachkin (González Valdés et al., 2009, Bagbiegue y Herrera Suárez, 2015). Con el valor de  $P_t$  y de la velocidad de trabajo del arado se determinó también la potencia necesaria para realizar el laboreo de la tierra con este implemento.

La fuerza de tracción  $P_t$  se calculó según la expresión (2.1):

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 \quad (2.1)$$

Donde:

$P_1$ : es la resistencia del arado al desplazamiento en el surco. (Depende del peso  $G$  y del coeficiente de fricción suelo-metal  $f$ . Por datos experimentales obtenidos de la literatura, el coeficiente  $f$  en valor promedio<sup>4</sup> es de 0,5 (Bagbiegue, 2013).

$$P_1 = Gf \quad (2.2)$$

$G$ : peso propio (ver ecuación 2.5)

Sustituyendo los diferentes valores se obtiene que  $P_1 = 2\,413,26$  N.

El término  $P_2$  define la resistencia a la tracción del arado, de acuerdo con el ancho y la profundidad de la capa del suelo cortada. Se determina por la ecuación:

$$P_2 = K_d ab \quad (2.3)$$

donde:

$K_d$ : Coeficiente de resistencia específica del suelo. Para los suelos ligeros este coeficiente se puede tomar igual hasta 39,24 kPa, para suelos medios de 39,42 kPa a 58,86 kPa, y para suelos pesados de 58,86 kPa a 78,48 kPa<sup>5</sup>

<sup>3</sup> Mulet Ochoa, R. A. (2015). "Simulación del ensayo a tracción de una unión soldada a tope de acero AISI1015 y electrodo E6013"

<sup>4</sup> El valor del coeficiente de fricción suelo-metal  $f$  se encuentra entre 0,4 y 0,6. (González et al., 2009)

<sup>5</sup> (Silveira, 1982; Bagbiegue, Herrera Suárez, 2015).



Como coeficiente de resistencia específica del suelo  $K_d$  se tomó 78,48 kPa debido a que en la revisión bibliográfica realizada se observó la variedad de suelos que existen en Cuba (Hernández Jiménez et al., s/f, Instituto de suelos, 1973, Hernández-Jiménez et al., 2019, Ecured, 2020). En entrevistas realizadas con especialistas se conoció que las condiciones de los suelos dependen de las labores que se le realizan.

$a$ : altura de la capa vegetal. Se corresponde con la profundidad de trabajo máxima del arado AFT-4, que es de 0,25 m.

$b$ : ancho de la capa vegetal. Es la cuerda de la circunferencia del disco a la profundidad de trabajo máxima. Es igual a 0,640 m para un disco del AFT-4.

Con los datos presentados se sustituyó en la ecuación y se obtuvo que para un disco la fuerza  $P_2$  es igual a 12 556,8 N y para cuatro discos esta suma 50227,2 N.

El término  $P_3$  caracteriza la resistencia a la tracción del arado debido a la velocidad de avance  $v$  y de la fuerza empleada en el lanzamiento del prisma del suelo cortado. Esta se determina según la ecuación:

$$P_3 = abv^2 \quad (2.4)$$

donde:

$\varepsilon$ : Coeficiente que depende de la forma de la superficie de trabajo del arado y de la profundidad de labranza.

Este parámetro está entre 1 962 Ns<sup>2</sup>/m<sup>4</sup> a 4 905 Ns<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>. (Silveira, 1982) Se tomó la dimensión máxima por las mismas causas explicadas al seleccionar el coeficiente de resistencia específica del suelo  $K_d$ . La fuerza  $P_3$  es igual a 2 188,73 N y de 8754,92 N para uno y cuatro discos respectivamente.

Una vez determinados los valores para las fuerzas  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$  y se sustituyó en la ecuación (2.1). Se obtuvo que la fuerza de tracción  $P_t$  es igual a 61 395,38 N.

Otra fuerza que actúa durante el funcionamiento del arado es el peso propio del mismo. Este se calculó por la ecuación (2.5) y su valor es de 4 826,52 N.

$$G = mg \quad (2.5)$$

donde:  $m$ : masa máxima del arado.  $g$ : aceleración de la gravedad. Su valor es de 9,81 m/s<sup>2</sup>.

La potencia demandada por el arado  $N$  se determina con la ecuación (2.6).

$$N = P_tv \quad (2.6)$$



En las condiciones extremas de trabajo del arado AFT-4 (o sea, suelos pesados, profundidad de trabajo máxima de 0,25 m y velocidad de trabajo igual a 6 km/h) la potencia necesaria para la tracción del apero es de 102,33 kW.

## 2.7. Estado tensional-deformacional del soporte soldado de los rodamientos

En el desarrollo de esta investigación se procedió a evaluar el estado tensional-deformacional que se produce en ese conjunto.

El soporte soldado de los rodamientos ha sufrido roturas durante la explotación del arado AFT-4. El fallo de la pieza se produce en la zona de la soldadura donde se unen el cuerpo del soporte y el brazo que lo sostiene. La forma de unión de estos elementos se realiza mediante proceso de soldadura FCAW. En la parte superior el disco atornillado también se une por soldadura al brazo.

Se realizó un estudio estático mediante el Método de los Elementos Finitos para evaluar el estado tensional-deformacional del soporte soldado solicitado por las cargas que actúan sobre él. Estas son la reacción vertical y la suma de las resistencias que ofrece el suelo. Para determinar las resistencias que ofrece el suelo se aplicó la fórmula racional de Goriachkin y se obtuvo que el valor de estas, igual a 15 358,7 N. Esta se aplicó como una carga remota.

Para determinar su posición se definió un sistema local de coordenadas en el centro del núcleo del soporte y con respecto a este se ubicó la carga remota en el centro de gravedad de la zona del disco que se mantiene debajo de la tierra. Fue preciso determinar sus componentes rectangulares debido a la posición inclinada del disco respecto a la línea de acción de la fuerza de tiro del tractor (Fig. 2.2)

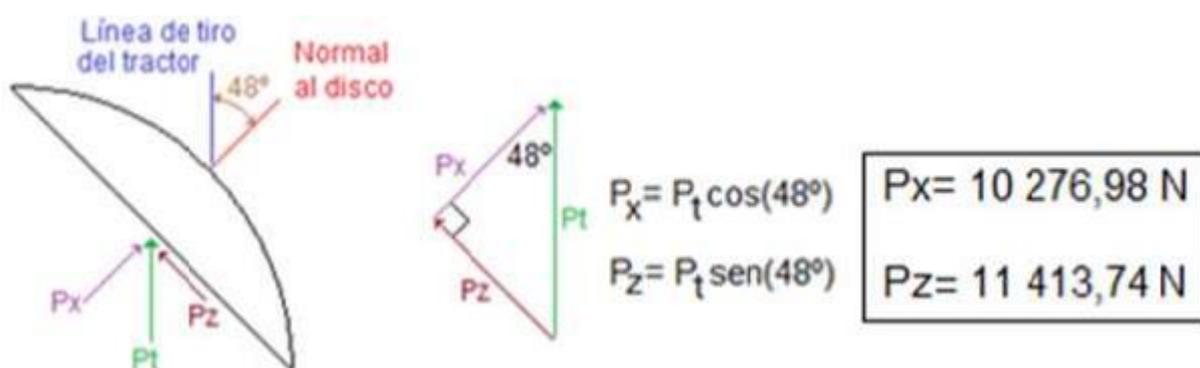


Fig. 2.2 Componentes rectangulares de la fuerza de tiro sobre un disco.

Otra carga aplicada al soporte de los rodamientos es la reacción sobre este. De acuerdo con los resultados el disco menos cargado por la acción del peso propio es el último. Se consideró que como sobre este disco actúa la menor reacción del peso propio y como la



dirección de esta reacción provoca cargas de compresión, en este soporte es donde menos se induce el cierre de la grieta y por lo tanto, se utilizó la reacción sobre este disco para calcular el soporte.

Para determinar el valor de esta fuerza se realizó un estudio estático del chasis del arado AFT-4 solicitado por su peso propio para conocer las reacciones sobre cada disco. El software utilizado para modelar el equipo fue el SolidWorks 2016 mientras que las simulaciones se hicieron en el complemento Simulation que tiene incorporado el primero. El modelo geométrico del chasis del arado y las reacciones de apoyo se muestra en la Fig. 2.3. Como se observa en esa Fig. el peso propio del chasis es de 1 385,4 N. La otra carga mostrada es igual a 114,04 N y se corresponde con la mitad del peso del tubo que se encuentra acoplado en el punto de aplicación de la misma. De acuerdo con lo que se evidencia del modelo, mostrado en esa Fig., el primer disco es el más cargado de todos. La carga<sup>6</sup> que se aplica sobre este soporte es de 283,92 N.

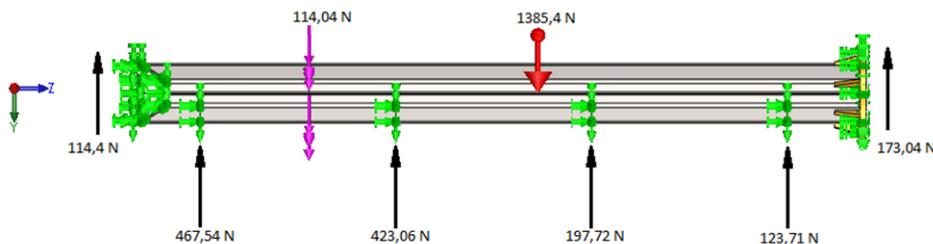


Fig. 2.3. Modelo geométrico del chasis del arado AFT-4.

Para aplicar las restricciones se consideró que en los orificios que se encuentran en la plancha superior, en los que se sitúan tornillos para fijar el soporte de los rodamientos al chasis del arado; existen restricciones fijas. También se consideró que, en el orificio central de la misma plancha, que sirve para que, a través de un vástago, fijar el soporte con la columna que lo soporta, también existen restricciones fijas. La Fig. 2.4 a muestra las cargas y restricciones aplicadas al soporte soldado de los rodamientos.

Para realizar el estudio estático se seleccionó una malla sólida con las siguientes características:

- el modelo constitutivo es elástico lineal debido a que se considera que las tensiones no sobrepasan el límite elástico del material;
- el tamaño máximo de elementos es de ocho milímetros con una tolerancia de 0,4 mm.

<sup>6</sup> Este valor se corresponde con la suma de la reacción sobre el cuarto disco mostrada en la Fig. A2.4, el peso del brazo y el peso del soporte de los rodamientos.



- para determinar las dimensiones de los parámetros de la malla se realizó un estudio de convergencia, cuyos resultados se exponen en la tabla 2.4.
- para el tamaño de elemento finito de ocho milímetros se logró la convergencia con un error porcentual igual a 4,74% y el tiempo de mallado igual a cuatro segundos.
- el tipo de elemento finito es elementos cuadráticos de alto orden.
- el número total de nodos y elementos es de 52 165 y 32 418, respectivamente
- la malla descrita se expone en la Fig. 2.4 b.
- los valores de las propiedades mecánicas del material base referidos al Módulo de Young y al Coeficiente de Poisson se encuentran en la tabla 2.2.
- para el material de aporte, al ser un acero se consideraron los mismos valores para estas propiedades.
- Referente a los valores del límite elástico y de rotura se exponen en las tablas 2.5 y 2.6 para el material base y el de aporte, respectivamente.

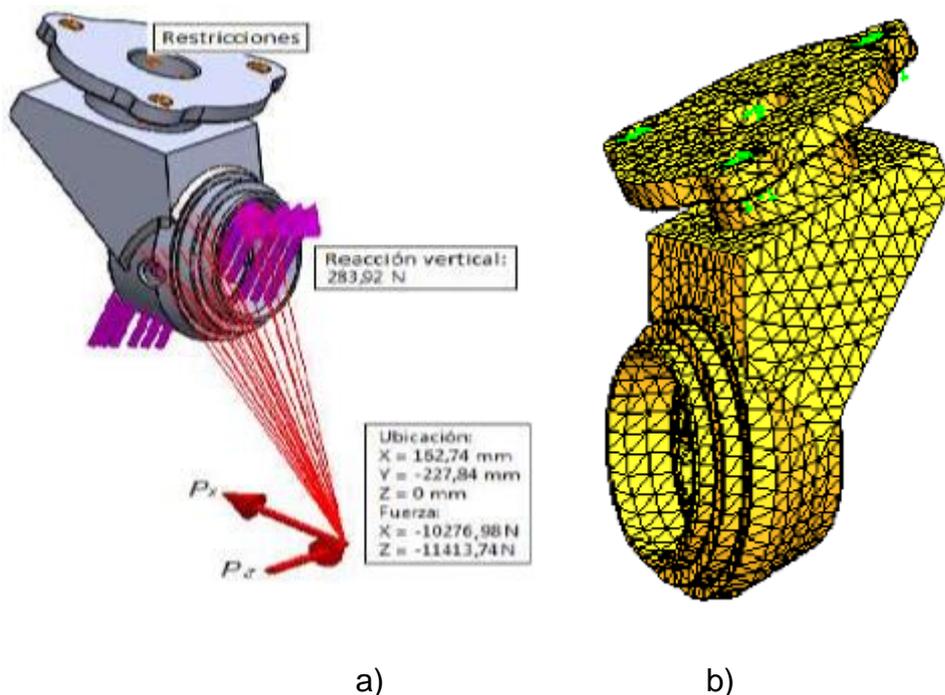


Fig. 2.4. a) Cargas y restricciones aplicadas. b) Mallado.



Tabla 2.6. Estudio de la convergencia del mallado en el modelo del soporte soldado de los rodamientos.

No.	Tamaño de elemento (mm)	Tiempo para mallar (s)	Tensión de Von Mises máxima (MPa)	Porcentaje de error (%)
1	11,83	3	241,86	-
2	10,00	3	268,03	9,76
3	8,00	4	281,38	4,74

Tabla 2.5. Propiedades del material base determinadas en el ensayo a tracción.

Propiedad	Valor
Límite elástico $\sigma_y$ (MPa)	336,55
Límite de rotura $\sigma_u$ (MPa)	431,18
Módulo de Young (GPa)	200
Coeficiente de Poisson	0,29

Tabla 2.6. Propiedades de la zona fundida de la unión soldada de acero AISI 1015 y alambre E71T-1.

Propiedad	Valor
Límite elástico $\sigma_y$ (MPa)	530,47
Límite de rotura $\sigma_u$ (MPa)	590,75

Con los parámetros explicados se ejecutó el estudio pseudodinámico del soporte soldado de los rodamientos y se obtuvo la distribución de tensiones y de desplazamientos que se muestra en las Fig.s 2.5 a, b y c.

Los mayores valores de tensiones surgen en la unión entre las planchas y la base del conjunto para unirlo con el brazo del chasis. Sin embargo, es de apreciar que en las zonas donde se unen las planchas al núcleo del soporte soldado (nodo 15 033 señalado en la Fig. 2.5 a y b) surgen tensiones, en el orden de los 145 MPa.

La Fig. 2.5 b expone una isosuperficie de tensiones superiores a 140 MPa. Se aprecia la concentración de tensiones en la unión entre las planchas y el núcleo del soporte. Precisamente es en esta zona por donde comienza la grieta que propicia el fallo del conjunto.

Los mayores valores de desplazamiento se encuentran en la zona inferior del núcleo del soporte soldado de los rodamientos y son iguales a 0,506 mm. Este resultado no afecta



el funcionamiento del conjunto, debido a que es muy pequeño en comparación con las dimensiones del elemento.

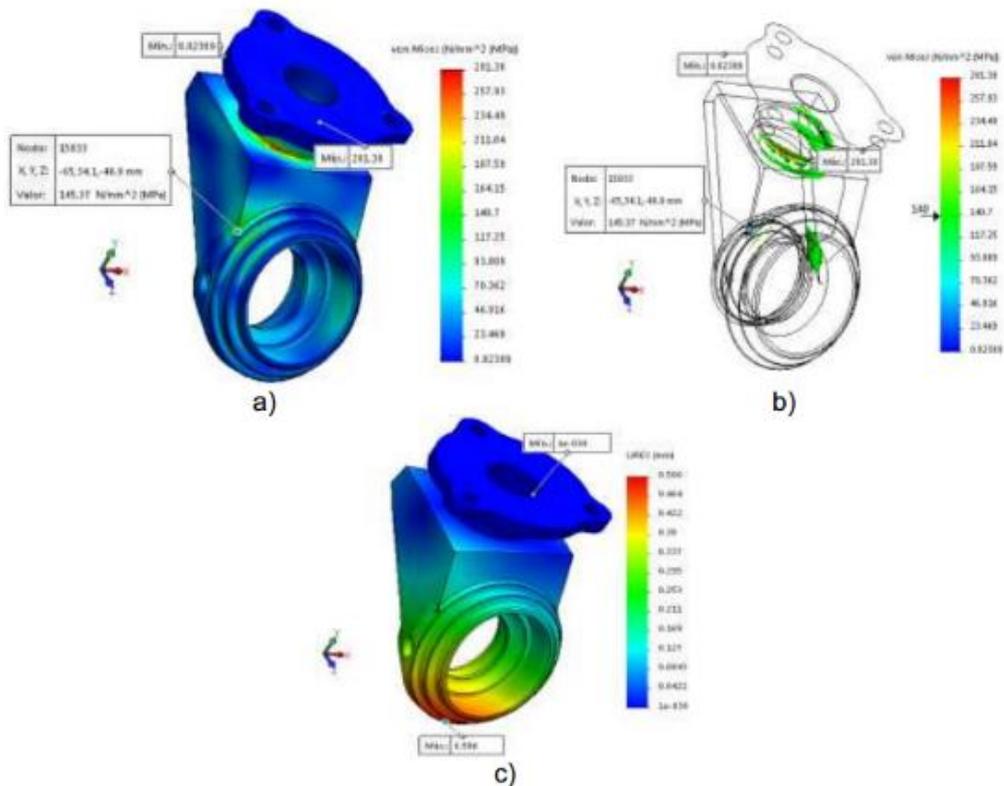


Fig. 2.5. Estudio estático del soporte de los rodamientos. a) Estado tensional. b) Isosuperficie de tensiones superiores a 140 MPa. c) Desplazamientos resultantes.

Como se aprecia en los resultados del estado tensional-deformacional las tensiones y desplazamientos debidos a la acción de las cargas pseudodinámicas no afectan el funcionamiento correcto del conjunto del soporte soldado de los rodamientos. Sin embargo, como se ha constatado durante la explotación del arado AFT-4 ocurre el crecimiento de grietas que provocan la rotura de este conjunto como puede apreciarse en la Fig. 2.6.



Fig. 2.6. Grieta en la zona de unión de las planchas con el núcleo del soporte



## CONCLUSIONES

Con este trabajo de Diploma se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Se determinó el estado tensional que surge en el soporte soldado de los rodamientos de arado AFT-4.
2. Se calcularon las cargas que actúan sobre el conjunto.
3. Los mayores valores de las tensiones no sobrepasan el límite elástico del material, sin embargo, se encontraron que existen zonas con concentración de tensiones que favorecen la nucleación y posterior desarrollo de grietas ante la acción de cargas variables.



## RECOMENDACIONES

Dada la importancia de este implemento agrícola se propone:

1. Realizar mediciones experimentales para evaluar la variación de las tensiones y las deformaciones durante la acción de las cargas cíclicas y las vibraciones que ocurren.
2. Realizar la simulación numérica de la respuesta del soporte ante la acción de la carga cíclica.
3. Rediseñar el soporte soldado para disminuir los valores de las tensiones en los diferentes concentradores que hay en el conjunto.



## BIBLIOGRAFÍA

1. *Almaguer Zaldivar, P. M. (2014). "Evaluación experimental y numérica del comportamiento a fatiga de una unión soldada a tope de acero AISI 1015 y electrodo E6013 cubano". (Tesis presentada en opción al título de Máster en CAD/CAM). Universidad de Holguín.*
2. *Almaguer-Zaldivar, P. (2013). Simulación numérica de la curva S-N de una unión soldada a tope. VIII Conferencia Científica de la Universidad de Holguín. Guardalavaca, Holguín. Memorias en CD ISBN: 978-959-16-2138-2.*
3. *Almaguer-Zaldivar, P. Martínez-Grave-de-Peralta, J. González-Utria, E. SantiagoCuenca, H. (2018). Evaluación de probetas cilíndricas solicitadas a torsión cíclica simétrica Ingeniería Mecánica. 21 (2), 93-100.*
4. *Almaguer-Zaldivar, Pavel Michel, Zambrano-Robledo, Patricia; Martínez-Grave de Peralta, José Alejandro; Cabral Miramontes, José Ángel; Pino-Tarragó, Julio César. (2019). "Evaluación a fractura de probetas de sección transversal cuadrada solicitadas a torsión cíclica". Vol. 22. No. 3, pp. 142-149, ISSN 1815-5944.*
5. *American Society for Metals. (1974). "Metals Handbook" Vol 9. 8th Edition.*
6. *ASTM International. (2000). Norma ASTM E 646 – 00. Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n -Values) of Metallic Sheet Materials. Estados Unidos.*
7. *ASTM International. (2001). E 3 – 01 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. Estados Unidos.*
8. *B.J. Hamrock, B. Jacobson y S.R. Schmid. (2000). "Elementos de Máquinas". McGraw Hill.*
9. *Berlijin, J. D. (1988). Manual para educación agropecuaria. Arados de discos. México, Argentina, España, Colombia, Puerto Rico, Venezuela: Editorial Trillas.*
10. *Bison. (2018). Arado de discos. <http://www.bison.com.mx>*
11. *Bullón C., W. (2007) Simulación de un proceso de soldadura mediante un modelo termo - mecánico considerando el efecto de esfuerzos residuales utilizando el método de los elementos finitos. Memorias del 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica.*
12. *Echeverría, Ricardo (2003). Fracturas de Materiales*

Evaluación del estado tensional-deformacional del soporte soldado de los rodamientos del arado AFT-4



13. Fernández Levy, Gilda. (1981) Resistencia de Materiales./Gilda Fernández Levy. Ciudad de La Habana; Editorial Pueblo y Educación, 2 tomos
14. Forrest P.G. (1962). "Fatigue of Metals", Pergamon Press LTD.
15. González Morales, Guillermo A. (2010). Estudio sobre el comportamiento a fatiga de uniones soldadas a tope de acero 20 a las que se le realizan agujeros de alivios de tensiones. (Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico). Universidad de Holguín.
16. González Ponce de León, G.R. (2015). Estudio de la estructura portante de la sembradora de granos del municipio de Calixto García. (Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico). Universidad de Holguín.
17. Gotoh K, Niwa T, Anai Y. (2014). Fatigue crack growth behaviour of an out-of – plane gusset welded joints under biaxial tensile loadings with different phases. Procedia Materials Science. (3):1536–1541.
18. Guliáev, A. P. (1978). Metalografía. Editorial Mir. Moscú. 2 Tomos.
19. Ibáñez García, Miguel. (1966). Resistencia de materiales y estructuras. Editorial Dossat, Madrid.
20. Martínez Rosales, J. L. (2012) "Simulación numérica del comportamiento a fatiga de la unión soldada a tope de acero AISI 1015". (Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico). Universidad de Holguín.
21. Mulet Ochoa, R. A. (2015). "Simulación del ensayo a tracción de una unión soldada a tope de acero AISI1015 y electrodo E6013". (Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico). Universidad de Holguín.
22. Norma Cubana NC 04-72 Probeta para ensayos de tracción transversal en uniones soldadas a tope.
23. Oficina Nacional de Normalización. Cuba. (1986). Ensayo de tracción y resiliencia sobre probetas del metal de aportación. NC 08-13:1986. La Habana. Cuba. Oficina Nacional de Normalización.
24. Ortiz Albán, V. M. (2008). Diseño, construcción y evaluación de un sistema de arado de discos reversible. (Proyecto de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecánica Automotriz). Latacunga, Ecuador.
25. Otero Pereiro, L. (2006) "Aprendiendo sobre el Método de los Elementos Finitos", Facultad de Ingeniería Mecánica, CUJAE, La Habana, Cuba.
26. Ramos Rivero, Virgilio. (1989). Resistencia de Materiales. Ciudad de La Habana; Editorial Pueblo y Educación.

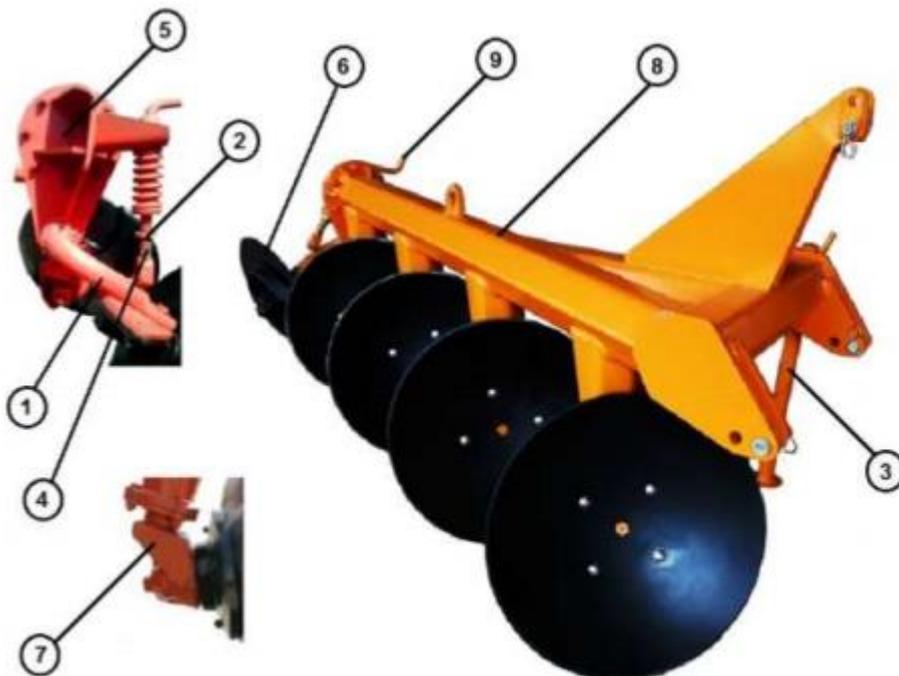


27. Rodríguez Ricardo, A. Santiesteban González, E. (2018). "Propuesta de diseño conceptual del Arado de Reversión Hidráulica ARH-5". (Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico). Universidad de Holguín.
28. Shigley, J.E. y Mischke, C.R.. (2002). "Diseño en Ingeniería Mecánica", McGraw Hill.
29. Silveira Remus, J. (1982). Cálculo de máquinas agrícolas.
30. Stiopin, P. A. (1976). Resistencia de Materiales. Editorial Mir 6ta Edición. Moscú.
31. Timoshenko, Stephen. (1962). P. Resistencia de Materiales: 2da parte. Teoría y problemas complejos. España; Editorial Espasa Calpe.
32. Wei, L. W. James, M.N. (2002). Fatigue crack closure for inclined and kinked cracks. International Journal of Fracture. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. No. 116. p 25–50



## ANEXOS

### Anexo 1. Arado Fijo Tubular AFT-4



En la Fig. se señalaron los principales conjuntos y piezas del arado AFT-4. Las funciones de estas se describen a continuación.

Evaluación del estado tensional-deformacional del soporte soldado de los rodamientos del arado AFT-4

1. Brazo de la Rueda. A este conjunto se acoplan la rueda de surco y su mecanismo de regulación. Permite mantener la horizontalidad del arado acoplado con el tractor, la estabilidad de la marcha y la profundidad de trabajo del mismo.
2. Tuerca. Posibilita la elevación y descenso de la rueda de surco al desplazarse por el tensor para lograr la tensión del muelle.
3. Apoyo del arado. Este elemento constituye el apoyo del arado cuando no se encuentra en el régimen de trabajo.
4. Tensor. Por este elemento se desplaza la tuerca que tensa al muelle para definir la altura con respecto al terreno de la rueda de surco. De esta manera permite mantener la estabilidad de la marcha y la profundidad de trabajo. También asimila los desplazamientos verticales de la rueda producidos por los desniveles del suelo porque las irregularidades del suelo.
5. Soporte de la rueda. Es un conjunto soldado que sostiene al brazo de la rueda de surco y al mecanismo para la regulación de los ángulos de trabajo de la misma.
6. Rueda de surco. Es la rueda que va dentro del surco. Forma un conjunto con el eje de la rueda lo que le permite realizar las regulaciones en la parte trasera del arado. Interviene en el control de la profundidad de trabajo, posibilita la marcha estable del arado y permite mantener la estabilidad transversal en la marcha.
7. Soporte del disco.
8. Bastidor tubular. Es un conjunto soldado formado por dos piezas conformadas en frío y soldadas entre sí. En él se sueldan los brazos a los que se acoplan los soportes de los discos mediante unión atornillada. Además al bastidor se unen las orejas de enganche inferior, la torre del tercer punto, el soporte del eje de la rueda y el alojamiento para el apoyo.
9. Manivela. Permite elevar o descender la rueda de surco en dependencia de la profundidad de la labor que se quiera obtener.

## Anexo 2. Soporte soldado de los rodamientos del arado AFT-4



## Anexo 3. Fractura con grietas semicirculares en el soporte



Evaluación del estado tensional-deformacional del soporte soldado de los rodamientos del arado AFT-4

Anexo 4. Conjunto del soporte: Elementos de sujeción y giro del disco

