

INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE CRAMPONES

DANIEL GÓMEZ GÓMEZ

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN
2010

INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE CRAMPONES

Daniel Gómez Gómez

Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Asesor:

Jorge Luis Restrepo Ochoa
Ingeniero Mecánico

ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
UNIVERSIDAD EAFIT
MEDELLÍN
2010

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su constante apoyo durante toda la carrera y en especial durante la ejecución del proyecto de grado. Gracias por darme la oportunidad de estudiar, creer en mí y depositar toda su confianza durante tantos años de logros y fracasos.

Al personal del laboratorio de materiales por su ayuda durante las pruebas de laboratorio y asesoría en la selección del material y tratamiento térmico.

Al personal de los talleres de ingeniería de la Universidad EAFIT por su apoyo durante la construcción de los *Prototipos*.

Al personal del Parque Nacional de los Nevados, en especial a su director, el señor Jorge Hernán Lotero por los permisos especiales otorgados para la prueba de campo y su amabilidad y hospitalidad durante la estadía en dicho parque.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	9
1. OBJETIVOS	11
1.1. OBJETIVO GENERAL	11
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.2.1. Objetivo 1	11
1.2.2. Objetivo 2	11
1.2.3. Objetivo 3	11
1.2.4. Objetivo 4	12
1.2.5. Objetivo 5	12
1.2.6. Objetivo 6	12
2. MARCO TEÓRICO	13
3. ESTADO DEL ARTE	16
3.1. TIPOS DE CRAMPONES	16
3.1.1. Según su material	17
3.1.2. Según el tipo de construcción y rigidez	17
3.1.3. Según el número de puntas	18
3.1.4. Según la forma de las puntas frontales	18
3.1.5. Según el sistema de fijación	19
3.2. RECOMENDACIONES	20
3.3. ELECCIÓN DEL MODELO	21
3.4. BLACK DIAMOND CONTACT STRAP WITH ABS PLATE	22
3.5. C.A.M.P USA UNIVERSAL XLC 490	23
3.6. BLACK DIAMOND SABRETOOTH PRO STEP-IN WITH ABS PLATES	24
3.7. PETZL CHARLET SARKEN LEVERLOCK	25

3.8.	BLACK DIAMOND CYBORG PRO STEP-IN WITH ABS PLATES	26
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	28
4.1.	SELECCIÓN DEL MATERIAL	28
4.1.1.	Tratamientos térmicos.....	31
4.2.	ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.....	40
4.2.1.	Mallado	40
4.2.2.	Análisis 1: simulación de pisada	42
4.2.3.	Análisis 2: carga puntual horizontal en las puntas	45
4.2.4.	Análisis 3: carga distribuida horizontal en las puntas.....	49
4.2.5.	Análisis 4: carga puntual vertical en las puntas	52
4.3.	PROTOTIPOS	55
4.3.1.	Prototipo 1.....	55
4.3.2.	Prototipo 2.....	56
4.3.3.	Prototipo 3.....	58
4.4.	PRUEBAS DE LABORATORIO	60
4.4.1.	Prueba de las puntas	60
4.4.2.	Prueba de carga dinámica	62
4.4.3.	Prueba de carga (compresión) en la universal.....	64
4.5.	SELECCIÓN PROTOTIPO FINAL	65
4.6.	PRUEBAS DE CAMPO.....	71
4.7.	COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES DE EXPERTOS.....	77
5.	CONCLUSIONES	79
6.	RECOMENDACIONES	81
	BIBLIOGRAFÍA.....	83
	PLANOS	86

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Grappettes de los Alpes	13
Ilustración 2. Primeros prototipos de crampones modernos	14
Ilustración 3. Crampón de Eckenstein	14
Ilustración 4. Crampón de Grivel.....	15
Ilustración 5. Black Diamond contact strap	23
Ilustración 6. C.A.M.P USA universal XLC 490.....	24
Ilustración 7. Black Diamond Sabretooth Pro Step-In with ABS Plates.....	25
Ilustración 8. Petzl charlet sarken leverlock.....	26
Ilustración 9. Black Diamond Cyborg Pro Step-In with ABS Plates.....	27
Ilustración 10. Diagrama hierro-carbono. Temperaturas de tratamiento de los aceros al carbono.....	32
Ilustración 11. Dureza según temperatura de revenido	37
Ilustración 12. Mallado <i>Prototipo 1</i> con 12325 elementos.....	41
Ilustración 13. Mallado <i>Prototipo 2</i> con 6516 elementos.....	41
Ilustración 14. Mallado <i>Prototipo 3</i> con 15768 elementos.....	42
Ilustración 15. Resultados del análisis 1 para el <i>Prototipo 1</i>	43
Ilustración 16. Resultados del análisis 1 para el <i>Prototipo 2</i>	43
Ilustración 17. Resultado del análisis 1 para el <i>Prototipo 3</i>	44
Ilustración 18. Concentración de esfuerzos en punto de apoyo	44
Ilustración 19. Resultado del análisis 2 para el <i>Prototipo 1</i>	46
Ilustración 20. Resultado del análisis 2 para el <i>Prototipo 2</i>	46
Ilustración 21. Resultado del análisis 2 para el <i>Prototipo 3</i>	47
Ilustración 22. Concentración de esfuerzos en punto de aplicación de la carga	47
Ilustración 23. Resultado del análisis 3 para el <i>Prototipo 1</i>	49
Ilustración 24. Refinamiento indebido de malla en <i>Prototipo 1</i>	50
Ilustración 25. Resultado del análisis 3 para el <i>Prototipo 2</i>	50

Ilustración 26. Resultado del análisis 3 para el <i>Prototipo 3</i>	51
Ilustración 27. Resultado del análisis 4 para el <i>Prototipo 1</i>	52
Ilustración 28. Resultado del análisis 4 para el <i>Prototipo 2</i>	53
Ilustración 29. Resultado del análisis 4 para <i>Prototipo 3</i>	53
Ilustración 30. <i>Prototipo 1</i> después del corte por plasma	55
Ilustración 31. Fracturas generadas por el doblado del material	56
Ilustración 32. Resultado final <i>Prototipo 1</i>	56
Ilustración 33. Piezas básicas del <i>Prototipo 2</i> después del corte por láser y taladrado de agujeros de unión	57
Ilustración 34. Resultado final <i>Prototipo 2</i>	57
Ilustración 35. Despiece del <i>Prototipo 3</i>	58
Ilustración 36. Resultado final <i>Prototipo 3</i>	59
Ilustración 37. Imágenes de prueba de las puntas.....	61
Ilustración 38. Prueba de carga dinámica.....	63
Ilustración 39. Prueba estática de compresión en la Universal.....	65
Ilustración 40. Gráfica de matriz de selección	68
Ilustración 41. <i>Prototipo Final</i>	70
Ilustración 42. <i>Prototipo Final</i> acomodado a 3 botas diferentes.....	71
Ilustración 43. <i>Prototipo Final</i> apoyado sobre la nieve.....	72
Ilustración 44. <i>Prototipo Final</i> apoyado sobre hielo	72
Ilustración 45. <i>Prototipo Final</i> apoyado sobre roca	73
Ilustración 46. Prueba de puntas delanteras.....	74
Ilustración 47. Pruebas de puntas traseras.....	74
Ilustración 48. Prueba de campo	75
Ilustración 49. Desgaste del cromado.....	76

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Recomendaciones para los crampones.....	21
Tabla 2. Propiedades del Acero 1070 Recocido.....	29
Tabla 3. Efecto de los elementos aleantes en las características de los aceros para herramientas.....	30
Tabla 4. Temperaturas de temple y revenido	36
Tabla 5. Dureza vs. Esfuerzo de fluencia	38
Tabla 6. Resultados análisis 1	45
Tabla 7. Resultados análisis 2	48
Tabla 8. Resultados análisis 3	51
Tabla 9. Resultados análisis 4	54
Tabla 10. Ventajas y desventajas desde el punto de vista de construcción	60
Tabla 11. Costos, peso y carga de los 3 <i>Prototipos</i>	67
Tabla 12. Matriz de selección	67
Tabla 13. Costos totales del <i>Prototipo Final</i>	69
Tabla 14. Comparación precio-peso	70

INTRODUCCIÓN

Los deportes y actividades al aire libre tienen cada vez más acogida debido a la vida agitada de las ciudades. La gente de la ciudad tiene como alternativa de descanso y relajación salir a practicar deportes que implican un contacto directo con la naturaleza. Generalmente estos deportes se practican en las montañas, las cuales proveen de un ambiente calmado pero al mismo tiempo una experiencia de aventura.

El trekking y montañismo son deportes que tienen contacto directo con la naturaleza y presentan grandes oportunidades de diversión. El trekking es más común debido a que no requiere de montañas muy altas sino simplemente de caminos, trochas o carreteras entre las montañas. El montañismo, por el otro lado es mucho más técnico debido a que requiere de equipo especial al igual que un buen entrenamiento y conocimiento de las técnicas, equipos y riesgos que se toman al practicarlo.

La nieve es un factor importante en el montañismo, lo cual reduce mucho más la práctica de este deporte. Sin embargo, los practicantes de este deporte crean un vínculo personal y emocional con la montaña que hace olvidar el poco protagonismo que tiene éste dentro de otros deportes más populares.

Los crampones son equipos muy importantes dentro de la práctica del montañismo cuando se va a caminar ó escalar sobre nieve. Los crampones son plantillas que se le acomodan a los zapatos, las cuales tienen puntas agudas que se entierran en la nieve y aumentan el agarre del escalador a la nieve o hielo (Poindexter, 1998).

Los crampones, al igual que la gran parte del equipo para montañismo, son muy costosos, limitando aún más el número de practicantes de este deporte. Es por esto que en este proyecto se pretende hacer una investigación y desarrollar un *Prototipo* de crampones que garanticen la seguridad del usuario por medio de pruebas de laboratorio y de campo, pesen poco y puedan ser adquiridos por mucho menos dinero que los comerciales.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar, analizar y construir un *Prototipo* de crampones económicos y livianos, garantizando seguridad y resistencia por medio de elementos finitos y pruebas de laboratorio y de campo.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.2.1. Objetivo 1

Reconocer los diferentes tipos de crampones que existen en el mercado al igual que sus ventajas y desventajas, describiendo los principales requisitos de diseño.

1.2.2. Objetivo 2

Diseñar varios *Prototipos* de crampones que puedan ser construidos y analizados por medio de elementos finitos.

1.2.3. Objetivo 3

Implementar pruebas de laboratorio a los *Prototipos* diseñados para analizar su resistencia, desempeño y fallas imprevistas.

1.2.4. Objetivo 4

Analizar los *Prototipos* haciendo una matriz de selección comparando su resistencia máxima, peso y costo para escoger el *Prototipo Final*.

1.2.5. Objetivo 5

Probar el *Prototipo Final* escogido bajo condiciones reales en la nieve y analizar su desempeño.

1.2.6. Objetivo 6

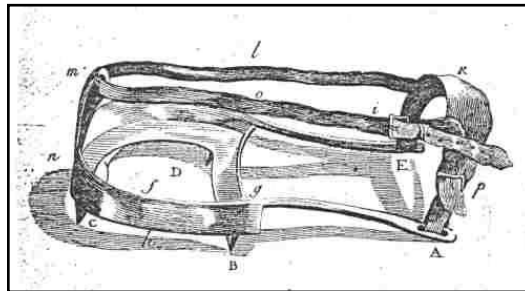
Concluir con los principales resultados obtenidos.

2. MARCO TEÓRICO

Los primeros registros de crampones, o algo parecido, datan de la era romana en el siglo II después de Cristo. Sin embargo, estos no eran utilizados para la nieve sino que eran utilizados por los espías romanos para caminar por terrenos difíciles.

Hacia el siglo XVI aparecen unos crampones llamados “grappettes” (ver ilustración 1), utilizados en los Alpes suizos por leñadores y cazadores para no resbalarse. Sin embargo este tipo de crampones tenían sólo 4 puntas y se acomodaban generalmente en la parte delantera o trasera del pie.

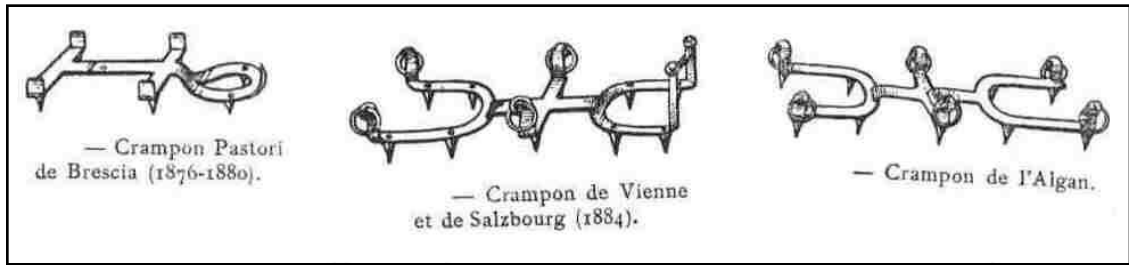
Ilustración 1. Grappettes de los Alpes



(Wolf (b), 2009)

Los prototipos similares a los actuales aparecen a finales del siglo XIX, con varios modelos como se puede observar en la ilustración 2.

Ilustración 2. Primeros prototipos de crampones modernos



(Wolf (b), 2009)

Los primeros intentos de crampones no fueron muy buenos y el crampón moderno se le atribuye al ingeniero inglés Oskar Eckenstein, quien en 1908 le encargó a un herrero en Cormayeur (Italia), Henry Grivel la fabricación de estos. Este modelo contaba con 10 puntas, todas verticales (ver ilustración 3).

Ilustración 3. Crampón de Eckenstein



(Fende-Testas, 2007)

Eckenstein no pudo patentar su idea debido a que los ratones se comieron los planos originales. Este diseño se mantuvo durante varios años hasta que en 1929, el hijo del herrero italiano, Laurent Gravel le añadió 2 puntas frontales, permitiéndole el agarre en paredes verticales o muy empinadas.

Ilustración 4. Crampón de Grivel



(Wolf (b), 2009)

El diseño de Eckenstein se mantiene hasta ahora, con la única innovación hecha en los años 70 por Mike Lowe de ponerle cierres automáticos, sistema muy utilizado en los esquís (Wolf (b), 2009).

3. ESTADO DEL ARTE

En la actualidad, 2010, existen muchos modelos de crampones que varían en su diseño y características. Sin embargo, todos estos modelos tienen dos características en común: el bajo peso y alto costo. El modelo que se planea construir debe cumplir una de estas características y minimizar la otra. Este *Prototipo* debe mantener la característica de bajo peso pero debe minimizar considerablemente el costo.

El material seleccionado tendrá que ser liviano pero debidamente resistente a diferentes factores. El primer factor son las diferentes fuerzas y esfuerzos a los que está sometido. El segundo factor es el frío: los aceros comunes pierden gran parte de sus características mecánicas a los -8° C.

Las mejores aleaciones son las de Níquel- Cromo - Molibdeno: El Níquel aumenta la dureza, la resistencia a la corrosión y la eficacia en el tratamiento térmico (temple); el Cromo aumenta la resistencia; el Molibdeno aumenta la resistencia a las altas temperaturas (temple) y la resistencia a la fatiga, sobre todo a las bajas temperaturas (Soro, 2008).

3.1. TIPOS DE CRAMPONES

Los crampones se pueden clasificar según su material, su rigidez y su construcción, la cantidad de puntas, la forma de las puntas y según el sistema de fijación que poseen.

3.1.1. Según su material

El material es un aspecto muy importante en los crampones, ya que de esto depende su peso y resistencia en las condiciones extremas a las que se someten.

- Aluminio: La resistencia es menor debido a las características maleables del aluminio. Su ventaja es el peso, ya que se reduce considerablemente. Son recomendables para trekking o esquí de montaña donde los esfuerzos a los que están sometidos no son tan grandes.
- Acero: El peso es su desventaja, sin embargo, son mucho más resistentes y duran más. Se recomienda este material para escalada en hielo y alpinismo debido a los grandes esfuerzos que estas actividades requieren (Wolf, 2009)

3.1.2. Según el tipo de construcción y rigidez

El tipo de construcción se refiere a la forma en cómo están ubicadas las puntas con respecto a la bota del escalador. Los crampones pueden ser rígidos o articulados, según la necesidad del deportista o aficionado.

- Clásico: Las puntas están dobladas a 90° respecto a la base. Pueden ser articulados o rígidos, aunque existen modelos en que se puede cambiar su configuración de rígido a articulado según su uso. Un modelo articulado es mejor para caminar sobre nieve blanda, mientras que los rígidos son recomendables para escalada en hielo o caminar sobre este mismo.

- De caja: El perfil del crampon y sus puntas son perpendiculares a la suela, siendo completamente rígidos (Fende-Testas, 2007).

3.1.3. Según el número de puntas

Los crampones pueden tener diez o doce puntas dependiendo el tipo de agarre que requiera el terreno donde se realiza el deporte o necesidad del deportista.

- De 10 puntas: El crampon de 10 puntas está bajo las normas UIAA-153 y es utilizado principalmente para trekking debido a la gran estabilidad que presenta.
- Doce puntas: Las doce puntas presentan mayor estabilidad que los de 10 puntas, estos crampones son utilizados principalmente para alpinismo.
- Otros: Otros tipos de crampones son los de catorce puntas, aunque son muy escasos, se deben tener en cuenta a la hora de comprar crampones para el montañismo. También existen los de monopunta (sólo tienen una punta frontal y trasera) y son utilizados para escalar cascadas de hielo (López, 2009).

3.1.4. Según la forma de las puntas frontales

Las puntas están ubicadas de forma horizontal, vertical o mixta. Como las anteriores características, esto depende del tipo de deporte o de la necesidad del deportista en el terreno en el que vaya a utilizar sus crampones.

- Horizontales: Las puntas horizontales se utilizan para hielo y nieve, ya que en algunos casos los esfuerzos a los que están sometidos son mayores.
- Verticales: La nieve suave y los terrenos no muy empinados son los ideales para este tipo de crampones ya que no es necesario apoyarse en las puntas frontales.
- Mixto: Los crampones mixtos tienen las puntas frontales en forma de T, con el objetivo de combinar las características de los dos tipos mencionados anteriormente (Fende-Testas, 2007).

3.1.5. Según el sistema de fijación

El sistema de fijación es un componente muy importante en los crampones porque es el encargado de asegurar que los crampones se mantengan unidos y firmes a los pies del deportista durante toda clase de movimiento.

- Automáticos: Los crampones tienen una brida metálica en la puntera y una talonera de presión, también como una correa para evitar que se pierda el crampón en caso de soltarse. Sólo se pueden utilizar con botas rígidas que sean compatibles con estos. Cuando el ajuste es bueno, proporciona gran estabilidad, pero se debe probar antes de usarlo para confirmar que el crampón se ajuste debidamente a la bota.
- Semiautomáticos: Los modelos semiautomáticos tienen una talonera de fijación rápida y en la parte frontal una pieza, de plástico normalmente, con un pasador o agujero para pasar la correa. Su gran ventaja es que se pueden utilizar en botas rígidas o semirrígidas que tengan el acople

en el talón. Evitan generalmente los problemas de ajuste que presentan los automáticos.

- **Correas:** Los dispositivos de ajuste son correas o piezas de plástico que rodean la bota, logrando así ser ajustados a cualquier tipo de bota. La gran desventaja que presentan es que su fijación puede llegar a ser más incómoda que un crampon automático o semiautomático. También pueden generar una gran presión en los pies, generando incomodidad en el usuario (López, 2009).

3.2. RECOMENDACIONES

El buen rendimiento de los crampones no depende exclusivamente de la resistencia del material y el tipo de crampon, existen algunas recomendaciones que se deben tomar para garantizar el máximo rendimiento de éstos y la máxima seguridad para el usuario.

Algunas de estas recomendaciones se listan en la tabla a continuación.

Tabla 1. Recomendaciones para los crampones.

Nº	Recomendación
1	El crampón debe ser regulado mínimo 5mm más corto que la bota, nunca más largo para evitar que en el descenso se suelte y se vuelva peligroso.
2	Las correas deben ser apretadas y después deben ser revisadas constantemente durante la travesía.
3	Para afilar las puntas se debe utilizar una lima de corte fino y nunca una amoladora, pues esta puede dañar el tratamiento.
4	El crampón no debe calentarse por ningún motivo, pues puede afectar el tratamiento térmico.
5	Después de usar los crampones, se deben lavar con agua limpia, secarlos al aire libre y luego lubricarlos con grasa o silicona para evitar la corrosión.
6	No se debe caminar sobre piedras debido a que se pueden doblar las puntas, incluso fracturarlas.
7	Antes de salir a una expedición, se deben revisar el estado de los crampones, esto incluye los elementos de sujeción como correas, arandelas, pasadores, tornillos y todos los elementos que puedan influir en el buen comportamiento del equipo.
8	Se deben guardar en el maletín ya que las puntas pueden ser peligrosas para el usuario o para la demás gente.

(Soro, 2008)

3.3. ELECCIÓN DEL MODELO

La elección del modelo se basa tanto en el tipo de terreno que se va a recorrer como en el tipo de bota que se está utilizando. Estos dos factores afectan directamente el tipo de crampón que se debe utilizar. Se debe tener en cuenta qué tipos de actividades se van a practicar y el riesgo que éstas implican.

Los crampones con correas son la mejor opción para las botas sin muescas de sujeción o con suela flexible para trekking. Los modelos con cierres automáticos no son recomendados para este tipo de bota. Aunque las correas pueden ser un poco incómodas debido a la alta presión que le ejercen a los pies, en este caso pueden ser más seguras y cómodas debido a su gran compatibilidad que tienen con este tipo de bota.

El cierre automático es recomendado cuando las botas son de plástico y para los esquís. Este cierre en este tipo de botas garantiza la seguridad y es más cómodo debido a la rigidez de la bota.

Las cascadas de hielo y el hielo duro exigen una gran resistencia de los crampones. Para estas situaciones extremas, se recomiendan crampones rígidos, sin articulaciones. Las articulaciones pueden presentar daño por fatiga en estos casos, mientras que los rígidos resisten esfuerzos mucho más grandes sin presentar fallas (Soro, 2008).

A continuación se presentan varios crampones comerciales con sus especificaciones, sus ventajas y desventajas.

3.4. BLACK DIAMOND CONTACT STRAP WITH ABS PLATE

Los *Black Diamond Contact Strap* son crampones de última generación que poseen todas las características para competir debidamente en el mercado. Estos crampones son livianos, fáciles de usar, poseen buen agarre, son cómodos y muy versátiles. Comercialmente tienen un precio de US \$129.95 (Tasa de cambio \$1,786.20). Este precio no incluye los costos de envío.

Las correas autoajustables son un poco difíciles de usar y acoplar a la bota, algo que puede representar un gran peligro en situaciones extremas. Estos son crampones ajustables en tallas 34-46, cubriendo las tallas normales dentro de adultos. Su peso, como se menciona anteriormente es muy poco, 880 gr incluyendo sus correas. Están contruidos de acero inoxidable.

Ilustración 5. Black Diamond contact strap



(REI(a), 2010)

Los crampones tienen un diseño vanguardista y moderno que lo hacen muy atractivo a la vista.

3.5. C.A.M.P USA UNIVERSAL XLC 490

Los *C.A.M.P USA Universal XLC 490* son crampones livianos que se ajustan fácilmente al diseño de la bota. Al ajustarse cómodamente a la bota, evitan que el pie sea tallado constantemente generando molestias. Tienen un precio de US \$139.95 (Tasa de cambio \$1,786.20) sin tener en cuenta el costo de envío. Su mayor desventaja es su talón estrecho, lo cual incomoda mucho cuando se ponen en botas anchas.

Ilustración 6. C.A.M.P USA universal XLC 490



(REI(d), 2010)

Los crampones son ajustables a tallas entre 34-48. La mayor ventaja que poseen es su peso, ya que sólo pesan 605 gr debido a su marco en aluminio.

(REI(d), 2010).

3.6. BLACK DIAMOND SABRETOOTH PRO STEP-IN WITH ABS PLATES

Los *Black Diamond Sabretooth Pro Step-In with ABS Plates* son crampones muy cómodos, aunque son un poco pesados y sus correas de ajuste no son las mejores. Estas desventajas son complementadas con su gran versatilidad y buen agarre en las puntas. Su precio es de US \$169.95 (Tasa de cambio \$1,786.20) sin incluir el gasto extra del envío debido a que todos estos crampones son importados de Estados Unidos.

Ilustración 7. Black Diamond Sabretooth Pro Step-In with ABS Plates



(REI(c), 2010)

El peso no es extremadamente alto, sin embargo, es mayor a los dos anteriores, con un peso total de 970 gr. El marco está construido de acero inoxidable. Su ajuste varía entre las tallas 34-46.

(REI(c), 2010).

3.7. PETZL CHARLET SARKEN LEVERLOCK

Los *Petzl charlet sarken leverlock* son crampones muy cómodos y fáciles de ajustar a la bota. Sin embargo, su peso es elevado comparado con los demás de su tipo. Su precio es de US \$189.95 (Tasa de cambio \$1,786.20) un poco más alto que los anteriores.

Ilustración 8. Petzl charlet sarken leverlock



(REI(e), 2010)

El peso es un poco elevado comparado con los anteriormente analizados, 1010 gr. Están contruidos de acero templado. Se pueden ajustar a varias tallas que varían entre 34-46.

(REI(e), 2010).

3.8. BLACK DIAMOND CYBORG PRO STEP-IN WITH ABS PLATES

Los *Black Diamond Cyborg Pro Step-In with ABS Plates* son de los más pesados en el mercado, pero hay que tener en cuenta que son muy cómodos y poseen un buen agarre gracias a sus puntas con afilados especiales. Sin embargo, este afilado puede ser una desventaja debido a que se deterioran fácilmente. Su precio es de US \$199.95 (Tasa de cambio \$1,786.20).

Ilustración 9. Black Diamond Cyborg Pro Step-In with ABS Plates



(REI(b), 2010)

El peso total es de 1120 gr, el más pesado de los 5 que se analizaron. Está construido de acero inoxidable. La variación de tallas de este modelo es 34-46.

(REI(b), 2010).

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el diseño y construcción de los crampones hubo muchos factores importantes que se deben resaltar a fondo para comprender el proceso completo y como cada uno de estos factores influyó en el éxito de este proyecto.

4.1. SELECCIÓN DEL MATERIAL

Para la selección del material, se debía escoger un material que fuera tanto comercial, económico y con buenas propiedades mecánicas. Después de buscar y preguntar en el medio, fue recomendado el fleje recocido. El fleje recocido es utilizado para troqueles y cuchillas en el medio industrial.

El fleje recocido es Acero 1070 de 2mm de espesor con las siguientes propiedades:

Tabla 2. Propiedades del Acero 1070 Recocido

Propiedades Físicas	Métrico	Inglés	Comentarios
Densidad	7.85 g/cc	0.284 lb/in ³	
Propiedades Mecánicas	Métrico	Inglés	Comentarios
Dureza, Brinell	192	192	
Dureza, Knoop	214	214	Conversión de Dureza Brinell
Dureza, Rockwell B	91	91	Conversión de Dureza Brinell
Dureza, Rockwell C	11.0	11.0	Conversión de Dureza Brinell. El valor esta por debajo del rango normal de HRC, solamente por motivos de comparación.
Dureza, Vickers	201	201	Conversión de Dureza Brinell
Esfuerzo de Ruptura	640 Mpa	92800 psi	
Límite de Elasticidad	495 Mpa	71800 psi	
Elongación al Fracturarse	10.0%	10.0%	En 50 mm
Reducción de Área	45.0%	45.0%	
Módulo de Elasticidad	205 Gpa	29700 ksi	Típico del Acero
Módulo de Grano	140 Gpa	20300 ksi	Típico del Acero
Coeficiente de Poisson	0.290	0.290	Típico del Acero
Maquinabilidad	55%	55%	Basado en Acero AISI 1212 con maquinabilidad del 100%
Módulo de Ruptura	80.0 Gpa	11600 ksi	Típico del Acero
Propiedades Eléctricas	Métrico	Inglés	Comentarios
Resistividad Eléctrica	0.0000168 ohm-cm	0.0000168 ohm-cm	Condición del espécimen desconocida: 0°C (32°F)
	0.0000230 ohm-cm	0.0000230 ohm-cm	
	Temperatura a 100°C	Temperatura a 212°F	
Propiedades Térmicas	Métrico	Inglés	Comentarios
Capacidad Térmica Específica	0.490 J/g-°C	0.117 BTU/lb-°F	Condición desconocida: 50°C-100°C (122°F-212°F)
Conductividad Térmica	49.8 W/m-K	346 BTU-in/hr-ft ² -°F	Típico del Acero
Propiedades de los Aleantes	Métrico	Inglés	Comentarios
Carbon, C	0.65 - 0.75 %	0.65 - 0.75 %	
Hierro, Fe	98.26 - 98.75 %	98.26 - 98.75 %	Como recordatorio
Manganeso, Mn	0.60 - 0.90 %	0.60 - 0.90 %	
Fósforo, P	menor de 0.040 %	menor de 0.040 %	
Azufre, S	menor de 0.050%	menor de 0.050%	

(MATWEB)

Como se puede observar en la tabla 2, algunas de las propiedades de este acero no varían con las típicas de los otros aceros como son el módulo de elasticidad, de ruptura y el coeficiente de Poisson. Sin embargo, sí se diferencia por su alto esfuerzo de ruptura (495 MPa) y esfuerzo último (640 MPa).

Este es un acero de alto carbono (0,65%-0,75%) utilizado en aplicaciones de alta resistencia y donde se necesita rigidez y dureza (Groover, 1997).

Los aceros al carbono son aceros de precio relativamente bajo y fácil tratamiento térmico. Estos aceros tienen aplicaciones importantes no sólo en razón de su precio, sino también, porque, en algunos casos, responden de modo óptimo a algunas exigencias difíciles, como puede ser la exigencia de gran dureza superficial y al mismo tiempo una gran tenacidad en el núcleo. Las herramientas construidas de estos aceros pueden resistir perfectamente el desgaste de la superficie y choques importantes durante el uso (Aceros-de-LLodio-S.A., 1973)

Tabla 3. Efecto de los elementos aleantes en las características de los aceros para herramientas

CARACTERÍSTICA	ELEMENTO
Dureza a alta temperatura	Tungsteno, molibdeno, cobalto, vanadio, cromo, manganeso
Resistencia al desgaste por fricción	Vanadio, tungsteno, molibdeno, cromo, manganeso
Endurecimiento profundo	Manganeso, molibdeno, cromo, silicio, níquel, vanadio
Distorsión mínima en el temple	Molibdeno, cromo, manganeso
Resistencia al impacto	Vanadio, tungsteno, molibdeno, manganeso, cromo

(Martínez Gómez, 1997)

En la tabla 3 se describen las propiedades de los aleantes. Debido al alto contenido de manganeso en el acero 1070, se puede concluir que éste posee resistencia al impacto, distorsión mínima en el temple, endurecimiento profundo, resistencia al desgaste por fricción y dureza a alta temperatura. Todas estas características mecánicas son las que se necesitan para los crampones debido a las cargas dinámicas a las que éstos están sometidos constantemente.

A pesar de todas estas buenas propiedades mecánicas, el material debe ser sometido a un tratamiento térmico para mejorar algunas propiedades que serán necesarias para el buen funcionamiento de los crampones.

Según Asdrúbal Valencia Giraldo, existen tres reglas simples que se deben tener en cuenta cuando se diseña una parte que se debe someter a tratamiento térmico. Estas tres reglas son:

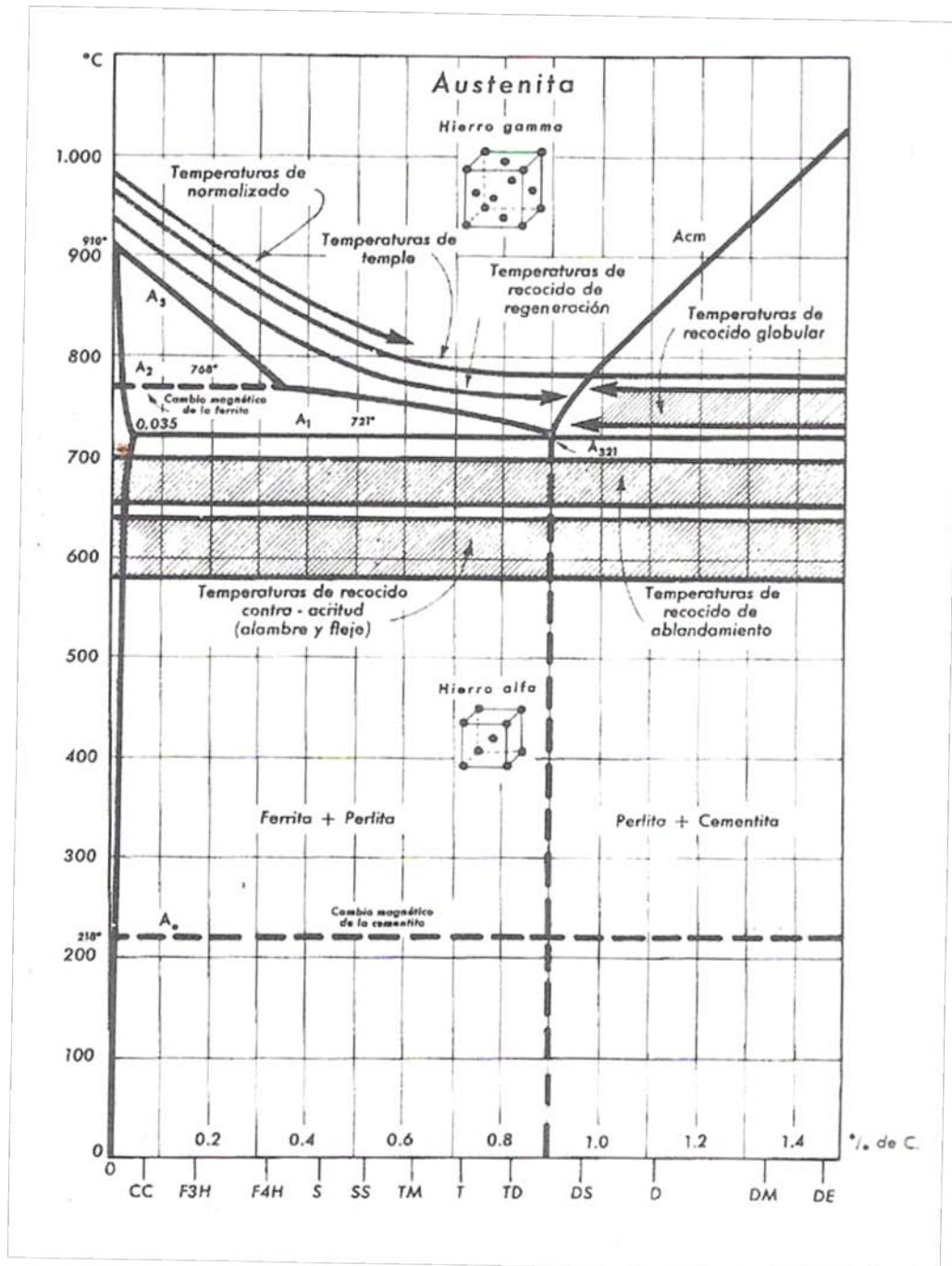
1. La distribución de la masa en la pieza debe ser tan uniforme como sea posible
2. Los radios de curvatura deben ser grandes y evitar las esquinas agudas y cantos filosos
3. Evitar cambios bruscos de sección (Valencia Giraldo, 1994)

El diseño de los tres *Prototipos* se hizo teniendo en cuentas estas reglas básicas para asegurar el mejor desempeño del material luego del tratamiento térmico.

4.1.1. Tratamientos térmicos

A pesar de que el material utilizado viene con un recocido que no hace parte del proyecto, es importante resaltar este pre-tratamiento a qué se debe y cómo se hace. También se explican los tratamientos de temple y recocido a los que estuvieron sometidos los *Prototipos* antes de ser probados en el laboratorio. El tratamiento final de cromado también es presentado y explicado. A continuación se presenta el diagrama hierro-carbono.

Ilustración 10. Diagrama hierro-carbono. Temperaturas de tratamiento de los aceros al carbono.



(Apraiz Barrero, 1985)

4.1.1.1. Recocido

El recocido es un tratamiento térmico que consiste en calentar el metal a una temperatura adecuada, en la cual se mantiene por un cierto tiempo y después se enfría lentamente. El recocido se realiza sobre un metal en cualquiera de los siguientes casos:

1. Para reducir la dureza y la fragilidad
2. Para alterar la micro estructura de manera que se puedan obtener las propiedades mecánicas deseadas.
3. Para ablandar el metal y mejorar su maquinabilidad o formabilidad
4. Para recristalizar los metales trabajados en frío (endurecidos por deformación)
5. Para aliviar los esfuerzos residuales inducidos por los procesos de formado previo (Groover, 1997)

Debido a que el acero 1070 es un acero laminado, este proceso genera un endurecimiento creando tensiones internas que deben ser eliminadas para reducir fragilidad y aumentar la maquinabilidad.

Como dice Paul M. Uterweiser, los aceros forjados que contienen 0.55-0.95% C deben ser recocidos porque:

- El refinamiento de la estructura forjada es importante para producir un acero duro de alta calidad
- Después del forjado, el acero es demasiado duro para poderse maquinar (Uterweiser, y otros, 1982)

La ferrita, cementita y perlita son los constituyentes característicos de los aceros recocidos. La ferrita es hierro alfa, o sea hierro casi puro, que puede contener en solución pequeñas cantidades de silicio, fósforo y otras impurezas. La cementita es carburo de hierro. Es el constituyente más duro y frágil de los aceros al carbono. La perlita es un constituyente eutectoide formado por capas alternadas de hierro alfa y carburo de hierro, o lo que es lo mismo, de ferrita y cementita (Apraiz Barrero, 1985).

Debido al alto contenido de cementita y por ende alta fragilidad, el material recocido debe someterse a un temple y revenido.

4.1.1.2. Temple

El temple tiene como objetivo endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. Para ello, se calienta en general el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y se enfría luego más o menos rápidamente (según la composición y el tamaño de la pieza) en un medio conveniente, agua, aceite, etc. (Apraiz Barrero, 1985).

Los materiales que se sometan a un temple deben ser precalentados a 600°C para, seguidamente, pasar a la temperatura de temple que está sobre unos 780-800°C manteniéndolos por espacio de 5 minutos por cada 10mm de espesor para proceder al temple en agua a temperatura de unos 20°C y a la que se le habrá adicionado cloruro sódico o soda cáustica ($\approx 10\%$) para disminuir la fase vapor y dar una tonalidad de acabado más uniforme (Aceros-de-LLodio-S.A., 1973).

Al calentar un acero, se modifica la estructura cristalina que tenía a la temperatura ambiente, quedando el acero formado a esta temperatura por

cristales de austenita. Estos cristales, al enfriarse el acero lentamente, se desdoblán y transforman en otros cristales de cementita y perlita. Pero si se enfría rápidamente, los cristales de austenita no tienen tiempo de transformarse y aparecen mezclados con agujas de martensita.

La austenita es una solución sólida de carbono o carburo de hierro en hierro gamma. Tiene gran resistencia al desgaste, siendo el constituyente más denso de los aceros. La martensita es el constituyente típico de los aceros templados. Está formado por una solución sólida sobresaturada de carbono o carburo de hierro en hierro alfa. Éste aumenta la dureza, resistencia y fragilidad del material. Después de los carburos y la cementita, es el constituyente más duro de los aceros (Apraiz Barrero, 1985)

Como se puede deducir, el alto contenido de martensita y austenita en el temple es el responsable de la resistencia al desgaste y la alta dureza de los materiales sometidos a este tratamiento térmico.

Sin embargo, un temple sólo no es suficiente debido a las altas tensiones que se generan en la estructura del material. Para aliviar estas tensiones y disminuir la fragilidad, se debe someter el material a un revenido.

4.1.1.3. Revenido

El revenido es un tratamiento térmico que se aplica a los aceros endurecidos para reducir su fragilidad, incrementar su ductibilidad y tenacidad y aliviar los esfuerzos en la estructura del material (Apraiz Barrero, 1985).

El revenido es un compromiso entre dos exigencias contradictorias – fragilidad y dureza. Se aumenta la resistencia y se disminuye la dureza, límite elástico y la

resistencia a la tracción. El calentamiento en el revenido tiene la función de eliminar las contracciones internas y disminuir la fragilidad. Por el otro lado, el enfriamiento elimina las tensiones residuales, y cuanto más lento sea el enfriamiento, menores serán estas tensiones (Aceros-de-LLodio-S.A., 1973)

Para las partes delgadas y con filo, como es el caso de los crampones, el enfriado se hace por medio de agua, mientras que para las otras partes en general se hace en aceite (Uterweiser, y otros, 1982).

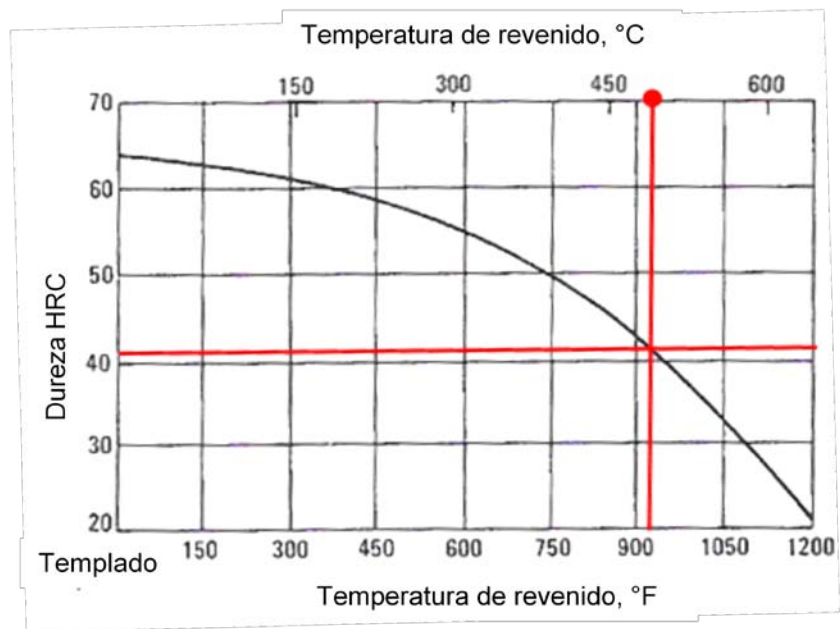
Tabla 4. Temperaturas de temple y revenido

Grado	Temp. de temple	Dureza HRC				
		Temperatura de revenido				
		100°C	200°C	300°C	400°C	500°C
1045	870°C	50	46	42	35	32
1050	860°C	58	52	45	37	33
1055	850°C	61	54	47	39	34
1060	840°C	62	56	48	41	35
1070	820°C	64	60	50	43	35
1080	800°C	66	62	52	45	36
6150 50CrV4	870°C	58	54	52	46	42

(HERMAC)

De acuerdo a la dureza final lograda por medio del tratamiento térmico realizado por TRATAR de 40-42 HRC, se puede deducir según la tabla 4, que la temperatura de temple fue de 820°C, mientras que la de revenido fue entre 400 °C -500 °C. O mejor aún, para encontrar un valor más preciso de la temperatura de revenido se hace referencia a la siguiente gráfica. Se deduce de esta que la temperatura de revenido es de aproximadamente 490 °C.

Ilustración 11. Dureza según temperatura de revenido



(Uterweiser, y otros, 1982)

Bajo estas temperaturas se garantiza la dureza y resistencia del material sin comprometer su fragilidad y resistencia al impacto. Estas dos últimas propiedades son muy importantes debido a que los crampones pueden estar sujetos a golpes con piedras o hielo que pueden generar fuerzas de impacto muy altas.

Al hacerle el tratamiento térmico, no solo la estructura molecular del material cambia, también lo hacen su dureza y propiedades mecánicas. Para el buen análisis de elementos finitos es importante tener el valor del esfuerzo de fluencia después del tratamiento térmico. Para esto, se hace referencia a la siguiente tabla.

Tabla 5. Dureza vs. Esfuerzo de fluencia

Valores Aproximados de Dureza Rockwell C y Esfuerzos de Fluencia para Aceros
 Para aceros al carbón y aleados en condiciones de recocido, normalizado y templado y recocido; valores menos acertados para aceros trabajados en frío y aceros austeníticos. Los valores en negrilla corresponden a los valores de las conversiones de dureza SAE-ASM-ASTM impresos en E140. Los valores en paréntesis están por fuera de rango y se dan por motivos informativos solamente.

Escala de Dureza Rockwell C	Dureza Vickers No.	No. Dureza Brinell		Escala A, carga de 132-lb (60-kg). Bola de Brale indenter	Escala B, carga de 220-lb (100-kg). Bola de diam. 1/16-in. (1.59-mm)	Escala D, carga de 220-lb (100-kg). Brale indenter	No Dureza superficial Rockwell Brite			No. Dureza Knoop, carga de 18-oz (500-g) y mayor	No. Dureza Shore Escleroscopio	Esfuerzo de fluencia aprox. 1000 psi (6.895 Mpa)	Escala de Dureza Rockwell C
		Carga de 6614-lb (3000-kg), bola de 0.39-in (10mm)	Bola de Carburo de Tungsteno				Escala 15N, carga de 33-lb (15-kg)	Escala 30N, carga de 66-lb (30-kg)	Escala 45N, carga de 99-lb (45-kg)				
68	940	...	...	85.6	...	76.9	93.2	84.4	75.4	920	97	...	68
67	900	...	...	85.0	...	76.1	92.9	83.6	74.2	895	95	...	67
66	865	...	...	84.5	...	75.4	92.5	82.8	73.3	870	92	...	66
65	832	...	(739)	83.9	...	74.5	92.2	81.9	72.0	846	91	...	65
64	800	...	(722)	83.4	...	73.8	91.8	81.1	71.0	822	88	...	64
63	772	...	(705)	82.8	...	73.0	91.4	80.1	69.9	799	87	...	63
62	746	...	(688)	82.3	...	72.2	91.1	79.3	68.8	776	85	...	62
61	720	...	(670)	81.8	...	71.5	90.7	78.4	67.7	754	83	...	61
60	697	...	(654)	81.2	...	70.7	90.2	77.5	66.6	732	81	...	60
59	674	...	(634)	80.7	...	69.9	89.8	76.6	65.5	710	80	351	59
58	653	...	615	80.1	...	69.2	89.3	75.7	64.3	690	78	338	58
57	633	...	595	79.6	...	68.5	88.9	74.8	63.2	670	76	325	57
56	613	...	577	79.0	...	67.7	88.3	73.9	62.0	650	75	313	56
55	595	...	560	78.5	...	66.9	87.9	73.0	60.9	630	74	301	55
54	577	...	543	78.0	...	66.1	87.4	72.0	59.8	612	72	292	54
53	560	...	525	77.4	...	65.4	86.9	71.2	58.6	594	71	283	53
52	544	(500)	512	76.8	...	64.6	86.4	70.2	57.4	576	69	273	52
51	528	(487)	496	76.3	...	63.8	85.9	69.4	56.1	558	68	264	51
50	513	(475)	481	75.9	...	63.1	85.5	68.5	55.0	542	67	255	50
49	498	(464)	469	75.2	...	62.1	85.0	67.6	53.8	526	66	246	49
48	484	(451)	455	74.7	...	61.4	84.5	66.7	52.5	510	64	238	48
47	471	442	443	74.1	...	60.8	83.9	65.8	51.4	495	63	229	47
46	458	432	432	73.6	...	60.0	83.5	64.8	50.3	480	62	221	46
45	446	421	421	73.1	...	59.2	83.0	64.0	49.0	466	60	215	45
44	434	409	409	72.5	...	58.5	82.5	63.1	47.8	452	58	208	44
43	423	400	400	72.0	...	57.7	82.0	62.2	46.7	438	57	201	43
42	412	390	390	71.5	...	56.9	81.5	61.3	45.5	426	56	194	42
41	402	381	381	70.9	...	56.2	80.9	60.4	44.3	414	55	188	41
40	392	371	371	70.4	...	55.4	80.4	59.5	43.1	402	54	182	40
39	382	362	362	69.9	...	54.6	79.9	58.6	41.9	391	52	177	39
38	372	353	353	69.4	...	53.8	79.4	57.7	40.8	380	51	171	38
37	363	344	344	68.9	...	53.1	78.8	56.8	39.6	370	50	166	37
36	354	336	336	68.4	(190.0)	52.3	78.3	55.9	38.4	360	49	161	36
35	345	327	327	67.9	(108.5)	51.5	77.7	55.0	37.2	351	48	157	35
34	336	319	319	67.4	(108.0)	50.8	77.2	54.2	36.1	342	47	153	34
33	327	311	311	66.8	(107.5)	50.0	76.6	53.3	34.9	334	46	149	33
32	318	301	301	66.3	(107.0)	49.2	76.1	52.1	33.7	326	44	145	32
31	310	294	294	65.8	(106.0)	48.4	75.6	51.3	32.5	318	43	141	31
30	302	286	286	65.3	(105.5)	47.7	75.0	50.4	31.3	311	42	138	30
29	294	279	279	64.7	(104.5)	47.0	74.5	49.5	30.1	304	41	135	29
28	286	271	271	64.3	(104.0)	46.1	73.9	48.6	28.9	297	40	131	28
27	279	264	264	63.8	(103.0)	45.2	73.3	47.7	27.8	290	39	128	27
26	272	258	258	63.3	(102.5)	44.6	72.8	46.8	26.7	284	38	125	26
25	266	253	253	62.8	(101.5)	43.8	72.2	45.9	25.5	278	38	122	25
24	260	247	247	62.4	(101.0)	43.1	71.6	45.0	24.3	272	37	119	24
23	254	243	243	62.0	100.0	42.1	71.0	44.0	23.1	266	36	117	23
22	248	237	237	61.5	99.0	41.6	70.5	43.2	22.0	261	35	114	22
21	243	231	231	61.0	98.5	40.9	69.9	42.3	20.7	256	35	112	21

(Uterweiser, y otros, 1982)

Según esta tabla, tomando una dureza promedio de 41HRC, el esfuerzo de fluencia del material templado y revenido es de 1296,26 MPa (188*6,895MPa). Con este valor se procede a analizar los resultados de elementos finitos.

4.1.1.4. Cromado

A pesar de que los tratamientos térmicos dan las propiedades mecánicas necesarias, queda faltando una propiedad muy importante; la resistencia al óxido. Debido al constante contacto que los crampones tienen con el hielo, el agua, la nieve y en general a la humedad, es importante protegerlos contra el óxido.

Para lograr esta protección existen varios tratamientos superficiales ofrecidos en el medio. El cromado es uno de estos recubrimientos superficiales que se usa para la resistencia al desgaste y la abrasión (Amstead, y otros, 1996). A pesar de que el cromo presenta alta resistencia al desgaste, debido a la pequeña capa superficial aplicada en las piezas, su función es exclusivamente la resistencia a la corrosión.

Esta pequeña placa aplicada a la superficie también compromete su cuidado. Expuesta al impacto continuo, este recubrimiento se desprende fácilmente. Debido al posible contacto con piedras y hielo sólido al que van a estar expuestos los crampones, existe la posibilidad de desgaste de este recubrimiento. Sin embargo, lo que se busca con el cromado es una protección parcial a la abrasión.

La demás protección se la deberá dar el usuario con los debidos cuidados. Estos cuidados incluyen secarlos luego de tener contacto con agua o nieve, protegerlos en un lugar seco cuando no se estén usando y untarles una pequeña capa de vaselina o algún otro lubricante cuando vayan a ser guardados por un periodo largo de tiempo.

4.2. ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

Los elementos finitos son una herramienta computacional que permite simular las cargas y fuerzas a las que están sometidos los modelos antes de construirlos para analizar el comportamiento frente a cargas y detectar fallas en el diseño. Para este caso, se hicieron 4 tipos de análisis con incrementos de carga para cada uno de los *Prototipos*.

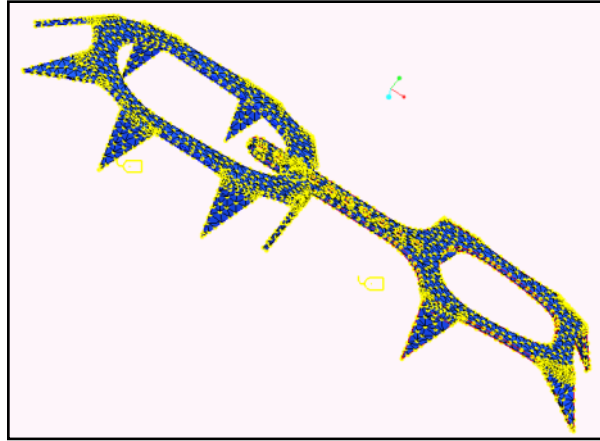
4.2.1. Mallado

En los análisis de elementos finitos, el mallado es un factor muy importante a tener en cuenta. A medida que se refina la malla, los resultados son más precisos. Sin embargo, el refinamiento de la malla implica la necesidad de un procesador más potente que en algunos casos puede generar problemas en computadores de uso básico.

Teniendo en cuenta este inconveniente, se debe escoger un refinamiento de malla que genere los mejores resultados sin poner en riesgo el buen funcionamiento del computador.

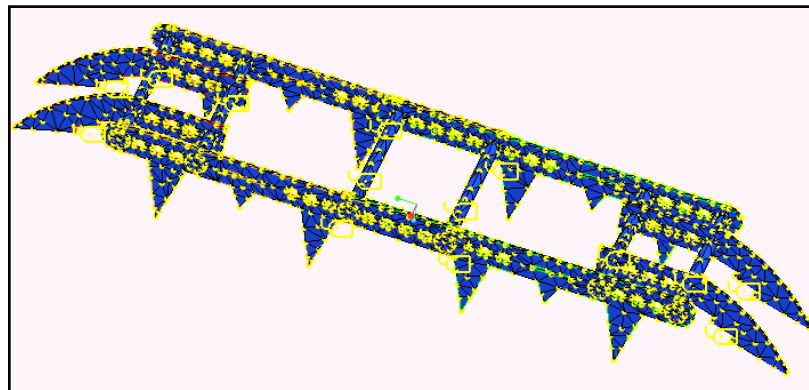
A continuación se muestran los mallados para cada uno de los *Prototipos* y los problemas que se presentaron en algunos de estos por refinamientos indebidos en algunas de sus partes.

Ilustración 12. Mallado *Prototipo 1* con 12325 elementos



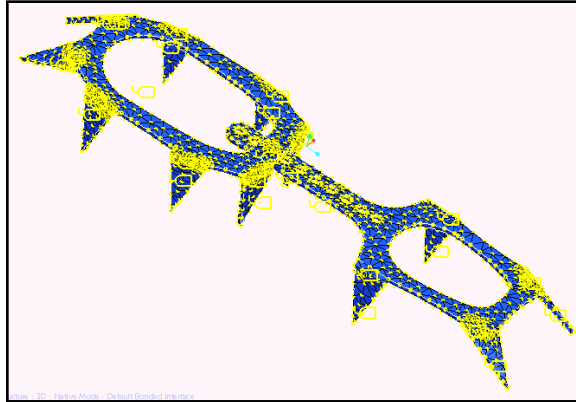
En la ilustración 12 se puede observar el refinamiento indebido en el doblado de las puntas. Este refinamiento se puede ver como los puntos de mayor densidad amarilla. Al doblar las puntas, el programa CAD-CAM en el que fue diseñado generó pequeñas áreas por la deformación del material, motivo por el cual el mallado se refinó en estos puntos.

Ilustración 13. Mallado *Prototipo 2* con 6516 elementos



En la ilustración 13 se puede observar que el *Prototipo 2*, que a pesar de sufrir un refinamiento de malla en los agujeros, estos no modificaron los resultados.

Ilustración 14. Mallado *Prototipo 3* con 15768 elementos



La ilustración 14 muestra zonas de gran densidad amarilla en la soldadura de las puntas a los marcos. Estas zonas generaron concentraciones de esfuerzos que fueron omitidos.

4.2.2. Análisis 1: simulación de pisada

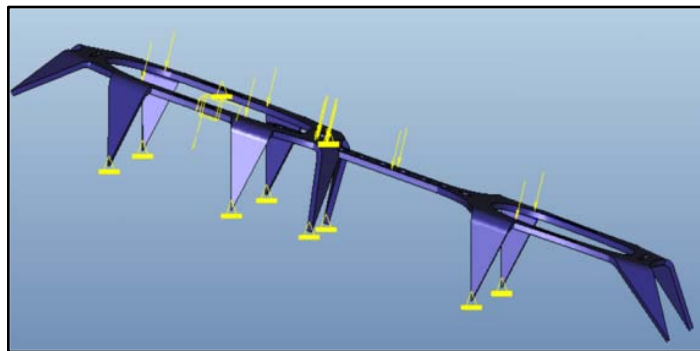
En este análisis se simuló la carga de pisada suponiendo que los crampones estuvieran apoyados en sus puntas sobre roca o hielo sólido.

Debido a la concentración de esfuerzos generados en el punto de apoyo en las puntas, se generaron esfuerzos muy grandes en estos puntos. Estas concentraciones representan una pequeña deformación de aplastamiento que sufren las puntas pero no ponen en riesgo la resistencia del modelo. Debido a esto, fueron omitidos estos puntos.

En las 4 tablas (6-9) a continuación se pueden observar los valores de los esfuerzos y desplazamientos máximos para los tres *Prototipos*. Los valores en rojo son los que exceden el esfuerzo de fluencia del acero 1070 templado (1296,26 Mpa).

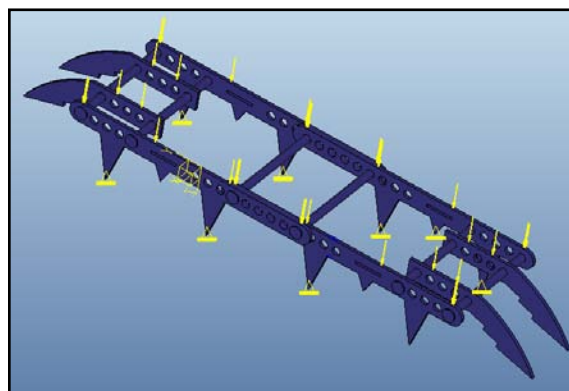
Omitiendo los puntos de concentración de esfuerzos, se encontró que los tres *Prototipos* resisten perfectamente estas cargas. En cuanto a las deformaciones, los *Prototipos 1 y 3* presentan deformaciones considerables en las partes delanteras y traseras debido a que estas no están apoyadas. Sin embargo, estas deformaciones son admisibles ya que no se encuentran en puntos críticos.

Ilustración 15. Resultados del análisis 1 para el *Prototipo 1*



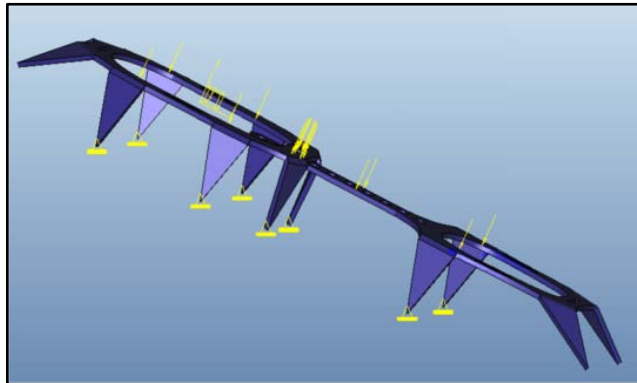
El resultado para este *Prototipo* se puede observar claramente. Se puede observar que el color predominante es el azul, el cual representa los bajos esfuerzos. Los esfuerzos altos se crearon en las zonas de apoyo como se puede ver en la ilustración 18.

Ilustración 16. Resultados del análisis 1 para el *Prototipo 2*



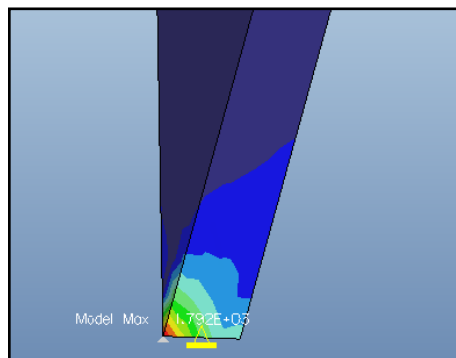
Este *Prototipo* también soportó muy bien las cargas y se generaron esfuerzos considerables sólo en los puntos de apoyo por la concentración de éstos.

Ilustración 17. Resultado del análisis 1 para el *Prototipo 3*



El resultado para este *Prototipo* fue igual que para los dos anteriores. El modelo aguantó perfectamente las cargas, generándose grandes esfuerzos sólo en los puntos de concentración de éstos en las zonas de apoyo.

Ilustración 18. Concentración de esfuerzos en punto de apoyo



En la ilustración 18 se observa en detalle los grandes esfuerzos generados en las zonas de apoyo ubicadas en las puntas. Sin embargo, estos esfuerzos se encuentran únicamente en estos puntos y no se distribuyen a través de las puntas.

Tabla 6. Resultados análisis 1

FUERZA (KN)	ESFUERZO MAX (MPa)	ESFUERZO MAX (MPa) sin tener en cuenta punto de concentración	DESPLAZAMIENTO (mm)
PROTOTIPO 1			
0.5	2289	228.9	1,85
0.75	3434	343.4	2,77
1.0	4579	457.9	3,69
1.25	5723	772.3	4,62
1.5	6868	886.8	5,54
PROTOTIPO 2			
0.5	534.8	2,93E-09	0,021
0.75	802.3	4,49E-09	0,032
1.0	1070	5,99E-09	0,043
1.25	1337	7,49E-09	0,054
1.5	1605	8,98E-09	0,065
PROTOTIPO 3			
0.5	901	179,2	1,8
0.75	1352	268,8	2,73
1.0	1792	358,4	3,64
1.25	2253	448,1	4,55
1.5	2703	537,7	5,47

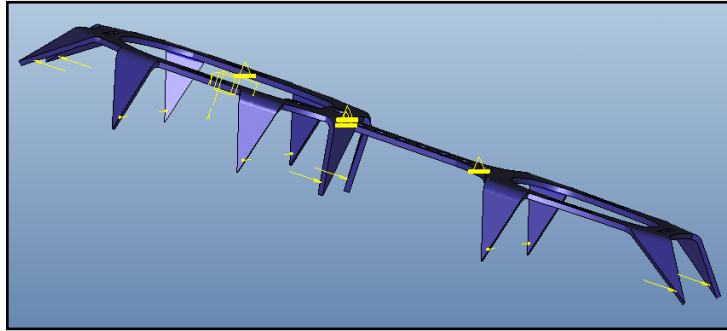
En la tabla 6 se puede ver que ninguno de los tres *Prototipos* excede es esfuerzo de fluencia del material. Además, las deformaciones son muy pequeñas en el *Prototipo 2* debido a su rigidez y mayores en los *Prototipos 1 y 3* por su falta de apoyo en las puntas delanteras y traseras.

4.2.3. Análisis 2: carga puntual horizontal en las puntas

En el análisis 2 se aplicaron cargas puntuales horizontales a 5 mm del extremo de cada punta y de adentro hacia afuera. En el punto de aplicación de las cargas se generaron concentraciones de esfuerzos, por lo cual estos puntos se

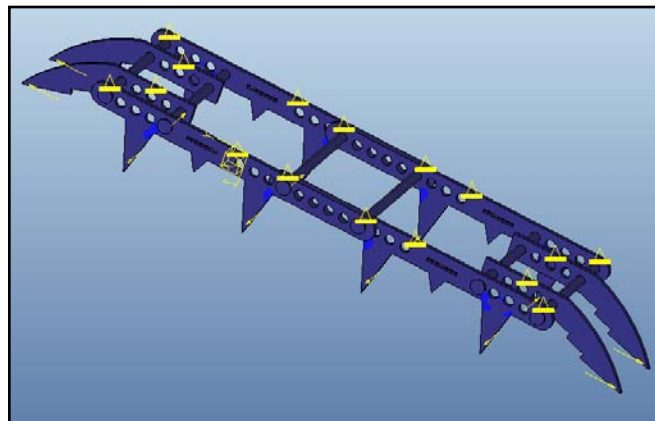
omitieron ya que no representan una medida real que implique un riesgo para el modelo.

Ilustración 19. Resultado del análisis 2 para el *Prototipo 1*



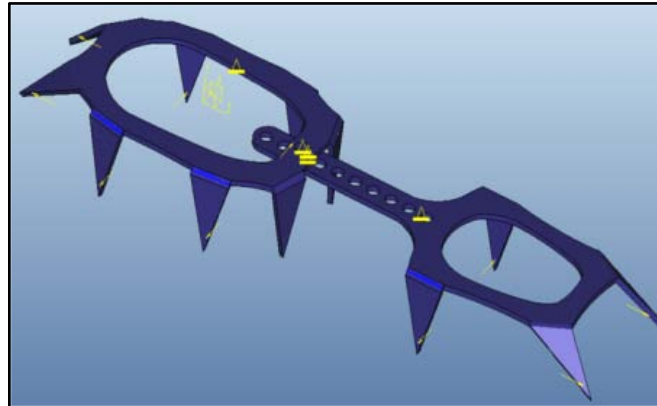
El *Prototipo 1* soportó muy bien las cargas horizontales. A pesar de que se crearon zonas de concentración de esfuerzos en los puntos de aplicación de las cargas, las puntas no sufrieron esfuerzos mayores al esfuerzo de fluencia del material.

Ilustración 20. Resultado del análisis 2 para el *Prototipo 2*



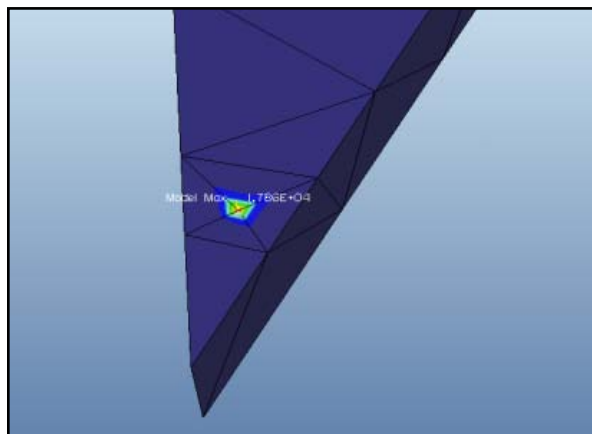
En este *Prototipo* no se presentaron esfuerzos grandes en la unión de las puntas con el marco debido a la falta de redondeo de estas aristas. Sin embargo, estos esfuerzos no superaron los esfuerzos de fluencia del material.

Ilustración 21. Resultado del análisis 2 para el *Prototipo 3*



En este *Prototipo* se generaron esfuerzos grandes en las zonas de soldadura debido al refinamiento indebido de la maya en estos puntos. Estos esfuerzos se ven representado por un azul más claro que el del resto del modelo en las uniones de las puntas con los marcos. A pesar de este refinamiento, los esfuerzos no excedieron el de fluencia del material.

Ilustración 22. Concentración de esfuerzos en punto de aplicación de la carga



Al omitir los puntos de concentración de esfuerzos que se observan en detalle en la ilustración 22, se puede ver en la tabla 7 que los resultados finales para los 3 *Prototipos* es la resistencia de éstos a las cargas horizontales aplicadas en las puntas.

Tabla 7. Resultados análisis 2

FUERZA (KN)	ESFUERZO MAX (MPa)	ESFUERZO MAX (MPa) sin tener en cuenta punto de concentración	DESPLAZAMIENTO (mm)
PROTOTIPO 1			
0.25	6038	7,73E-08	0,795
0.5	12080	1,55E-07	1,59
0.75	18115	2,32E-07	2,38
1	24154	3,09E-07	3,18
PROTOTIPO 2			
0.25	6319	1,474E-01	2.24
0.5	12637,7	2,95E-01	4.487
0.75	18956,6	4,42E-01	6,73
1	25275,5	5,89E-01	8,97
PROTOTIPO 3			
0.25	2095	419,1	0,965
0.5	4191	838,3	1,93
0.75	6287	1120,7	2,89
1	8382	1290,3	3,86

La tabla 7 muestra la resistencia de los 3 *Prototipos* ante la fuerza horizontal aplicadas en las puntas. El *Prototipo 3*, debido al refinamiento en las zonas de soldadura en las puntas, es el que mayores esfuerzos presenta, sin embargo, no alcanzan a exceder el esfuerzo de fluencia del material. Las deformaciones de los *Prototipos 1* y *3* son pequeñas, mientras que las del *Prototipo 2* son mayores, con una deformación máxima de 8.97mm.

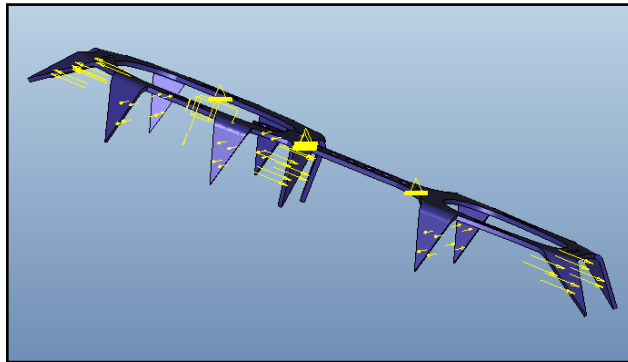
4.2.4. Análisis 3: carga distribuida horizontal en las puntas

Para evitar los puntos de concentración de esfuerzos generados por las cargas puntuales aplicadas en el análisis 2, se le aplicaron fuerzas distribuidas horizontales a las puntas.

En este caso apareció un problema en el modelo. Debido al doblado de las puntas en el *Prototipo 1* y la soldadura en el 3, se generaron unas inconsistencias del mallado en estas zonas. El mallado se refinó en estos puntos generando una concentración de esfuerzos.

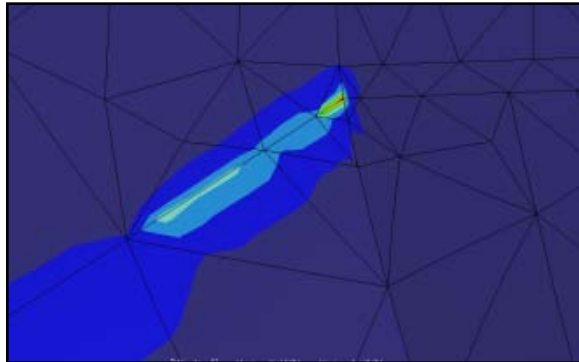
Debido a esto, se omitieron estos puntos y el resultado fue positivo. Los tres *Prototipos* resistieron las cargas sin problema alguno. Los desplazamientos en estos casos fueron insignificantes, siendo el mayor de alrededor de 1mm.

Ilustración 23. Resultado del análisis 3 para el *Prototipo 1*



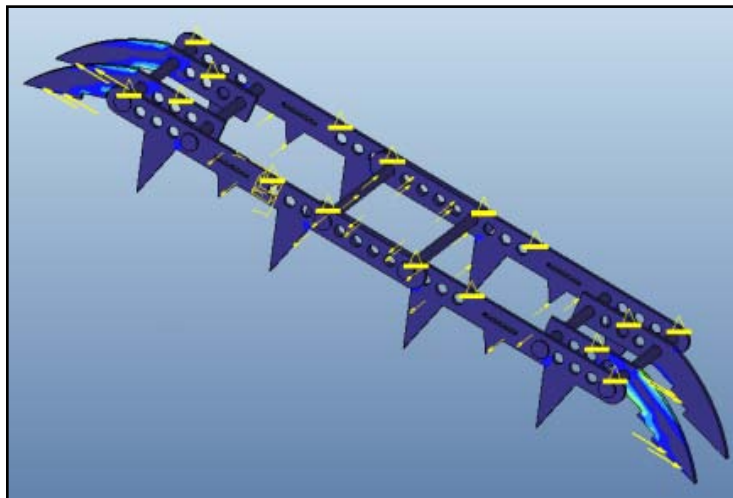
En este caso no se presentaron concentraciones de esfuerzos debido a las cargas sino al refinamiento indebido de la malla como se observa en la ilustración 24. Estos puntos fueron omitidos debido a que no presentan resultados correctos del análisis.

Ilustración 24. Refinamiento indebido de malla en *Prototipo 1*



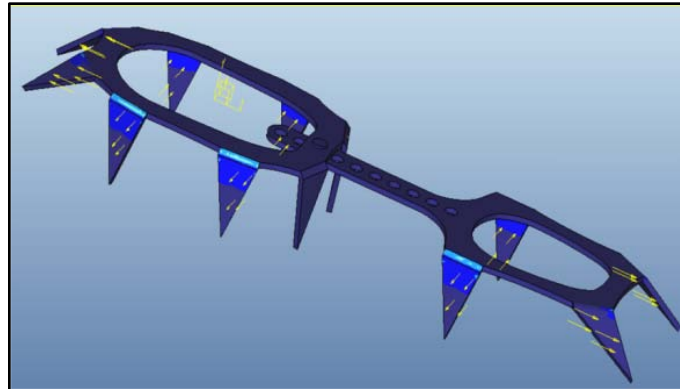
A la derecha de la ilustración 24 se puede observar una franja de malla rectangular un poco más refinada que la zona izquierda. Esta zona se encuentra en el doblado de una de las puntas del marco trasero del *Prototipo 1*. Estas inconsistencias en el mallado generan concentraciones erróneas que pueden ser omitidas por no presentar un correcto análisis de esfuerzos.

Ilustración 25. Resultado del análisis 3 para el *Prototipo 2*



La ilustración 25 muestra los mayores esfuerzos de este *Prototipo* en las puntas traseras y delanteras. A pesar de ser los mayores esfuerzos, ninguno de estos excede el esfuerzo de fluencia del material.

Ilustración 26. Resultado del análisis 3 para el *Prototipo 3*



Al igual que en los análisis anteriores, este *Prototipo* presentó algunos refinamientos indebidos del mallado en las zonas de soldadura. En la ilustración 26 se pueden observar estas zonas en color azul agua marina.

Tabla 8. Resultados análisis 3

FUERZA (KN)	ESFUERZO MAX (MPa)	ESFUERZO MAX (MPa) sin tener en cuenta punto de concentración	DESPLAZAMIENTO (mm)
PROTOTIPO 1			
0.25	2187	218,7	0,26
0.5	4374	437,5	0,52
0.75	6562	656,2	0,78
1	8749	875	1,04
PROTOTIPO 2			
0.25	201,7	1,11E-02	0,05
0.5	403,5	2,22E-02	0,101
0.75	605,2	3,33E-02	0,152
1	806,9	4,43E-02	0
PROTOTIPO 3			
0.25	578	173,6	0,266
0.5	1157	347,1	0,533
0.75	1736	520,7	0,799
1	2641	792,3	1,066

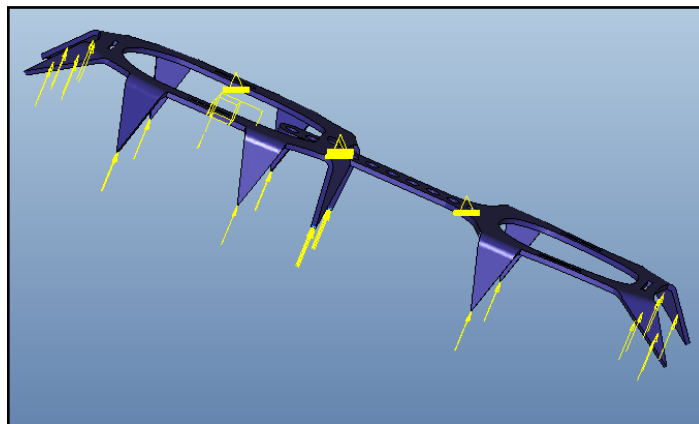
La tabla 8 muestra que ninguno de los *Prototipos* presentó esfuerzos mayores al de fluencia del material. Esto demuestra la resistencia de los modelos ante las fuerzas distribuidas horizontales aplicadas a las puntas.

4.2.5. Análisis 4: carga puntual vertical en las puntas

El análisis 4 es muy parecido al 1. La diferencia es que en este, las cargas están aplicadas verticalmente al extremo de las puntas mientras que el crampón se encuentra apoyado en la parte superior del marco.

Al igual que en el análisis 1, en los puntos de aplicación de la carga se generaron concentraciones de esfuerzo. Igualmente, se omitieron estos puntos ya que no representan riesgo alguno para los modelos. Los resultados fueron positivos como se observa en la tabla a continuación. Los *Prototipos* resistieron positivamente las cargas y sus desplazamientos fueron mínimos.

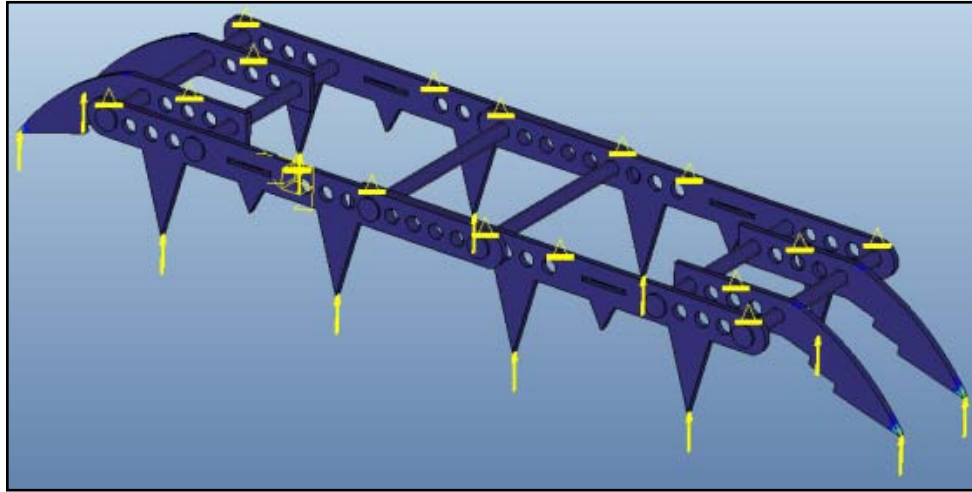
Ilustración 27. Resultado del análisis 4 para el *Prototipo 1*



El *Prototipo 1*, como se puede observar en la ilustración 27 por el color azul sólido, no presentó puntos débiles en el doblado de las puntas. Los esfuerzos

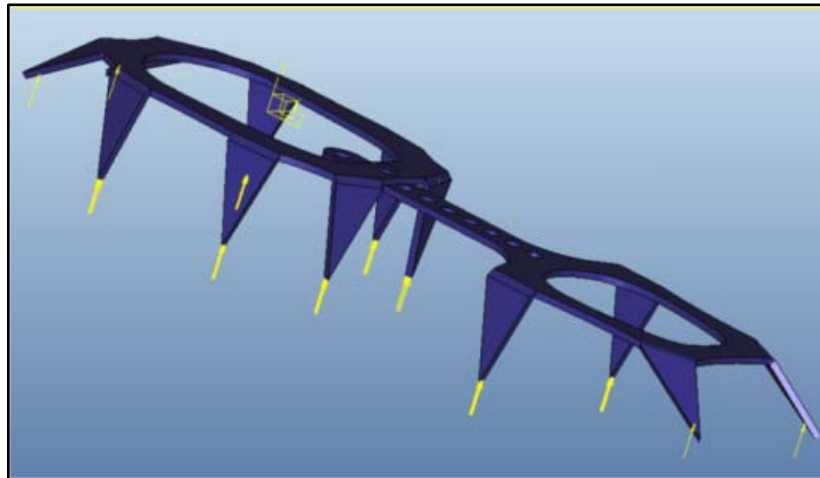
mayores se presentaron en las zonas de aplicación de las cargas por concentraciones indebidas de esfuerzos.

Ilustración 28. Resultado del análisis 4 para el *Prototipo 2*



En la ilustración 28 se puede observar la zona de concentración de esfuerzos en el punto de aplicación de la carga en las puntas traseras ubicadas en la zona inferior derecha de la figura.

Ilustración 29. Resultado del análisis 4 para *Prototipo 3*



El *Prototipo 3* también soportó las cargas satisfactoriamente, sin mayores esfuerzos a los de fluencia del material. En la figura 29 se puede observar el azul oscuro representativo de los esfuerzos mínimos.

Tabla 9. Resultados análisis 4

FUERZA (KN)	ESFUERZO MAX (Mpa)	ESFUERZO MAX (Mpa) sin tener en cuenta punto de concentración	DESPLAZAMIENTO (mm)
PROTOTIPO 1			
0.25	1775	177,5	0,126
0.5	3549	354,9	0,252
0.75	5323	532,4	0,378
1	7098	709,9	0,504
PROTOTIPO 2			
0.25	16423,3	1,21E-03	0,167
0.5	32846,6	2,39E-03	0,334
0.75	49269,9	3,64E-03	0,502
1	65693,2	4,85E-03	0,67
PROTOTIPO 3			
0.25	5561	630,9	0,125
0.5	9775	810,2	0,25
0.75	14657	1156,7	0,375
1	19548	1278,9	0,5

La tabla 9 muestra como los 3 *Prototipos* presentan esfuerzos máximos menores a los de fluencia del material. Esto garantiza la resistencia de éstos a las cargas verticales aplicadas.

4.3. PROTOTIPOS

La elección del *Prototipo Final* se hizo de acuerdo a las pruebas realizadas a los 3 *Prototipos* diseñados, sus costos y pesos. A continuación se presentan los 3 diseños con su respectiva descripción.

4.3.1. Prototipo 1

El *Prototipo 1* se hizo a partir de una pieza completa a la cual se le doblaron las puntas. La lámina de acero se cortó con plasma y una vez se habían pulido los bordes y hecho los agujeros de unión, se doblaron las puntas en una prensa y con martillo. Este es un crampón clásico de 12 puntas y puntas frontales mixtas.

Ilustración 30. *Prototipo 1* después del corte por plasma



En la ilustración 30 se puede observar la lámina cortada con plasma antes del doblar de las puntas. Al doblarle las puntas surgieron algunas fracturas del material como se puede observar en la ilustración 31.

Ilustración 31. Fracturas generadas por el doblado del material



Sin embargo, el material se pulió y redondeó en estas fracturas no generaron ningún tipo de inconveniente al ser tratados térmicamente.

El resultado final del *Prototipo 1* se puede observar en la siguiente ilustración.

Ilustración 32. Resultado final *Prototipo 1*

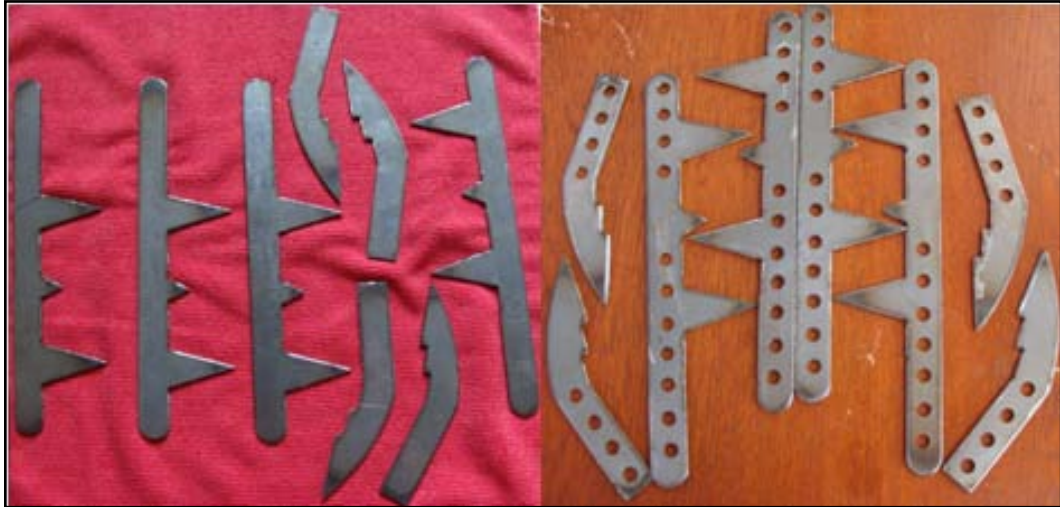


4.3.2. Prototipo 2

El *Prototipo 2* se hizo imitando un modelo muy distinto de crampones. Este modelo se hizo en base a los crampones de caja rígidos para escalar en hielo. El diseño es completamente diferente al *Prototipo 1* y 3 en todos los aspectos.

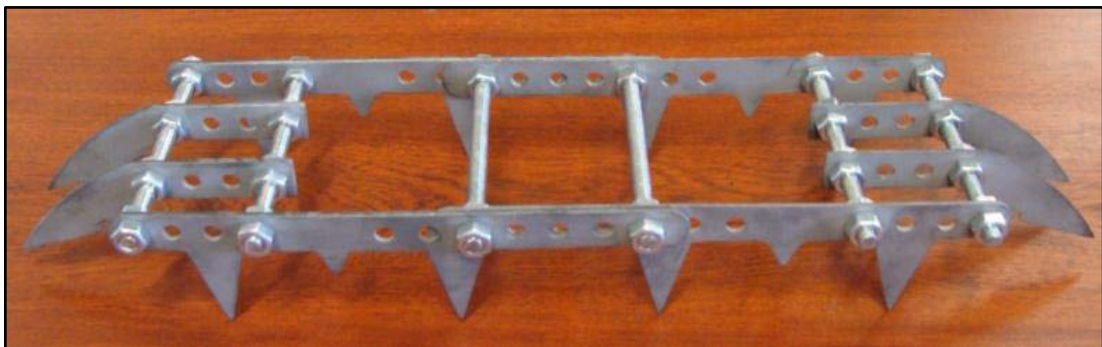
Este *Prototipo* se hizo a partir de 8 piezas cortadas por plasma y unidas por medio de eje roscado de $\frac{1}{4}$ ".

Ilustración 33. Piezas básicas del *Prototipo 2* después del corte por láser y taladrado de agujeros de unión



En la ilustración 33 se pueden ver las 8 piezas básicas del *Prototipo 3* después del corte por láser y el taladrado de los agujeros de unión respectivamente. Una vez hechos los agujeros de unión, las piezas se juntan por medio de 6 ejes roscados de $\frac{1}{4}$ " y tuercas para restringir el movimiento de las partes. A continuación se muestra el ensamble general de este *Prototipo*.

Ilustración 34. Resultado final *Prototipo 2*



4.3.3. Prototipo 3

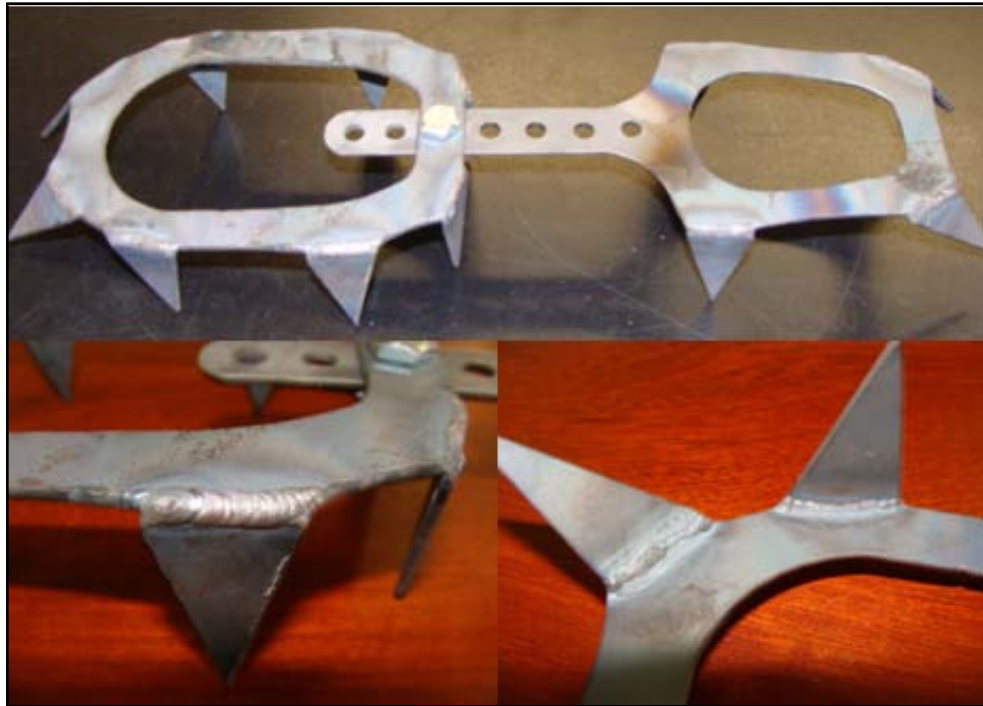
Este *Prototipo* es el mismo diseño básico del *Prototipo 1*. Sin embargo, las puntas no son dobladas sino soldadas al marco principal. De esta forma, se puede analizar el comportamiento y resistencia de las puntas dobladas y soldadas. Este es un crampón clásico de 12 puntas y puntas frontales mixtas. A continuación se presenta el despiece de este *Prototipo*.

Ilustración 35. Despiece del *Prototipo 3*



Como se observa en la ilustración 35, este *Prototipo* consta de 2 marcos y las 12 puntas que van soldadas a estos. El tratamiento térmico se le hizo a las piezas antes de ser soldadas para evitar fragilizar la soldadura.

Ilustración 36. Resultado final *Prototipo 3*



En la ilustración 36 se puede observar el resultado final del *Prototipo 3* y en detalle la soldadura de las puntas a los marcos principales.

De acuerdo a los tres *Prototipos* construidos, se puede presentar una lista de desventajas y ventajas desde el punto de vista de la construcción. A continuación se observa en la tabla 10 una comparación de los tres *Prototipos* de acuerdo a la construcción de estos.

Tabla 10. Ventajas y desventajas desde el punto de vista de construcción

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
PROTOTIPO 1	<ul style="list-style-type: none"> • Sólo contiene dos piezas • No exige una gran precisión en el taladrado de los agujeros de unión 	<ul style="list-style-type: none"> • Al doblarse las puntas, se presentan fracturas del material • Las puntas dificultan el manejo y maquinado de las piezas
PROTOTIPO 2	<ul style="list-style-type: none"> • No exige doblar ni soldar piezas 	<ul style="list-style-type: none"> • Exige gran precisión en el taladrado de los agujeros • Gran número de piezas
PROTOTIPO 3	<ul style="list-style-type: none"> • Las falta de puntas permiten una mejor manipulación y maquinado • No exige una gran precisión en el taladrado de los agujeros de unión 	<ul style="list-style-type: none"> • Gran número de piezas • Las puntas por ser tan pequeñas pueden perderse fácilmente • La soldada de las puntas no beneficia estéticamente al prototipo

4.4. PRUEBAS DE LABORATORIO

Los *Prototipos* fueron sometidos a varias pruebas tanto estáticas como dinámicas para probar la resistencia de éstos ante algunas fuerzas a las que pueden estar sometidas durante su vida útil.

4.4.1. Prueba de las puntas

Esta prueba estática básicamente consiste en apoyar todo el peso en las dos puntas traseras y delanteras respectivamente. De esta forma, no sólo se comprueba la resistencia de las puntas sino que se observa el comportamiento de todo el crampón con respecto a la suela del zapato.

Esta prueba se hizo apoyando las puntas en el borde de una escalera mientras una persona con un maletín cargado apoyaba todo su peso en éstas. El peso total de la persona y el maletín cargado con implementos de camping y

escalada para simular la carga a la que una persona puede estar sometida durante una acampada y escalada es de aproximadamente 90-95 Kg.

Ilustración 37. Imágenes de prueba de las puntas



En la ilustración 37 se puede observar el comportamiento de los tres *Prototipos* en la prueba de las puntas. Los *Prototipos* 1 y 3 se deforman y toman la forma de la suela del zapato, acomodándose mejor a ésta. Sin embargo, esto no

ocurre para el *Prototipo 2*, el cual se puede ver lo rígido que es, algo que puede resultar incómodo en una caminata larga.

También se observa que las puntas de los *Prototipos 1 y 3* sufren una pequeña deformación. Por el otro lado, las puntas del *Prototipo 2* no sufren deformación alguna.

De esta prueba se puede concluir que a pesar de que las puntas de los tres *Prototipos* son resistentes, las del *Prototipo 2* son las más sólidas. Sin embargo, también se puede concluir que en cuanto a comodidad y ergonomía, los *Prototipos 1 y 3* son mejores que el 2.

4.4.2. Prueba de carga dinámica

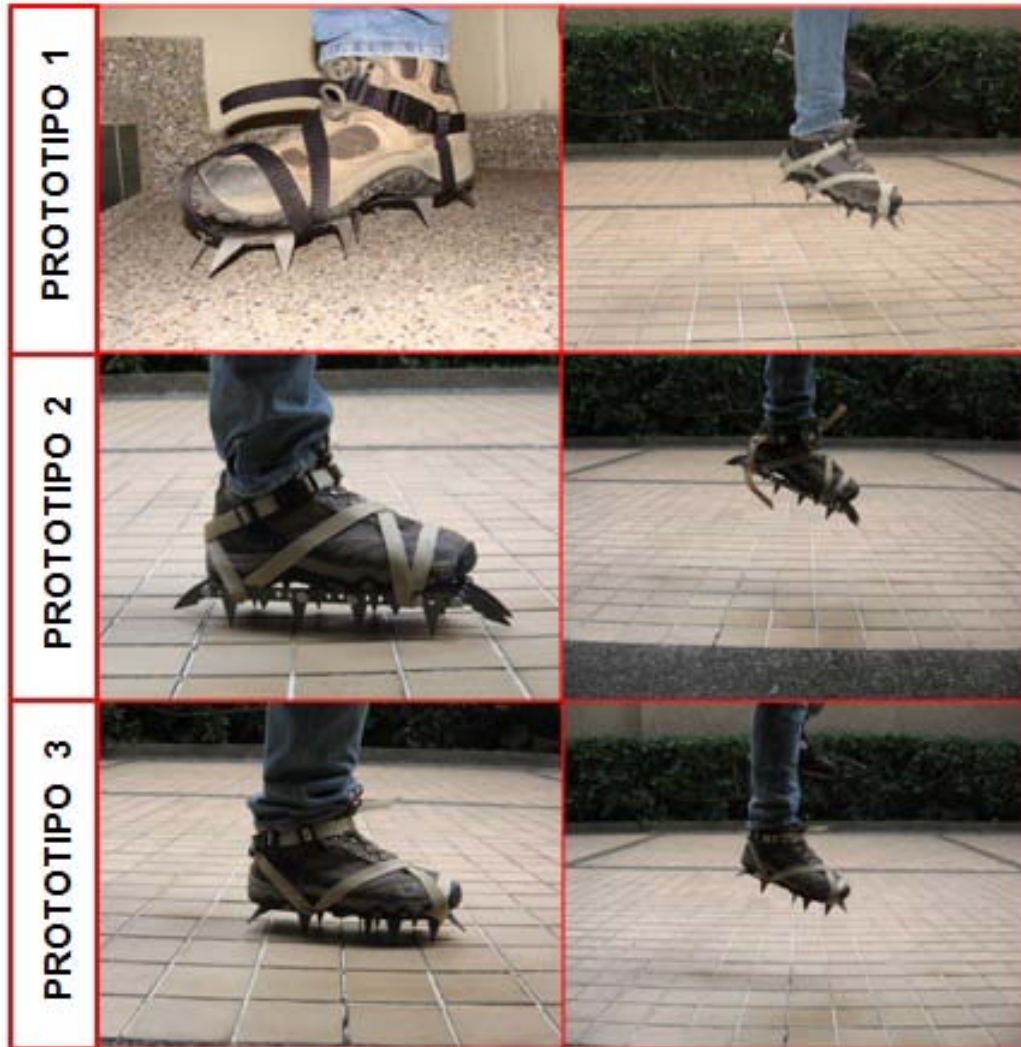
Para simular las posibles cargas dinámicas a las que pueden estar sometidos los crampones se hizo la siguiente prueba.

Para ser lo más realista posible, se metieron los crampones al congelador por un par de horas para exponerlos a temperaturas bajas cercanas a las reales. Luego se acoplaron los crampones a la bota y se saltó varias veces en el concreto. Esta prueba simula un posible contacto directo de las puntas con piedras o hielo sólido.

Se debe recordar que en realidad, los crampones no se apoyan en las puntas como tal sino que estas se entierran y el apoyo se genera en el marco. Sin embargo, al hacer esta prueba se puede analizar la resistencia de las puntas ante eventuales golpes directos que generen fuerzas impredecibles.

El resultado fue positivo para los tres *Prototipos*. A pesar de haber saltado varias veces en concreto, ninguno de los *Prototipos* sufrió ningún tipo de fractura o deformación de las puntas.

Ilustración 38. Prueba de carga dinámica



En la ilustración 38 se pueden observar los 3 *Prototipos* apoyados en el concreto y también en el momento en el que están en el aire. A pesar de haber estado sometido a continua carga dinámica, ninguno sufrió fracturas o deformación.

4.4.3. Prueba de carga (compresión) en la universal

A pesar de que la gran mayoría de las cargas a las que estarán sometidos los crampones son dinámicas, es importante hacer pruebas de carga estática para saber cuánta es la carga máxima permisible.

Para averiguar esto, se llevó a cabo una prueba en la máquina universal del Laboratorio de Materiales de la Universidad EAFIT. La prueba consistió en ubicar los crampones entre dos placas metálicas, una simulando ser una piedra o hielo sólido y otra simulando ser la suela del zapato.

Inicialmente se cargó hasta 4KN pensando que alguno de los *Prototipos* fallaría con una carga tan alta. Sin embargo, esta carga fue soportada por los tres *Prototipos* sin ningún problema. Debido a esto, se decidió aplicar una carga mayor hasta que fallaran.

A pesar de haber aumentado la carga hasta 16KN, ninguno de los *Prototipos* falló. En esta carga, se decidió suspender la prueba por motivos de seguridad. Debido al riesgo que representan las puntas y a las altas cargas soportadas por los tres *Prototipos*, no se pudo determinar la carga máxima admisible. Sin embargo, se comprobó la alta resistencia de los tres *Prototipos* diseñados.

Ilustración 39. Prueba estática de compresión en la Universal



En la ilustración 39 se pueden observar los tres *Prototipos* en la máquina universal siendo sometidos a una carga de compresión. La deformación fue mínima en los tres modelos y ninguno presentó falla o fractura alguna. Esta prueba confirmó la acertada decisión en cuanto material y tratamiento térmico se refiere.

Debido a la gran resistencia presentada por los tres *Prototipos*, la decisión tendría que ser tomada en base a una matriz de selección tomando en cuenta la resistencia, precio y costo.

4.5. SELECCIÓN PROTOTIPO FINAL

Debido a que los tres *Prototipos* pasaron las pruebas satisfactoriamente, no hubo ninguno que se descartara por falla prematura. Se tendría que seleccionar el *Prototipo Final* de acuerdo a los siguientes tres factores importantes:

- Resistencia: A pesar de la alta carga aplicada a los 3 *Prototipos* (16KN), ninguno falló. El factor de resistencia es muy importante debido a que los crampones son elementos que deben garantizar la seguridad del usuario. Se le da un peso del 40% debido a la directa relación que tiene con la seguridad del usuario.
- Costo: Uno de los motivos de este proyecto fue la creación de un *Prototipo* a un bajo costo debido a los altos costos de los crampones comerciales. Teniendo en cuenta esto, el costo es uno de los factores más importantes a tener en cuenta. Se le da un peso del 30% por la gran importancia que tiene con el motivo de realización del proyecto.
- Peso: Debido a que los accesos a nieve en este país implican en su mayoría caminatas de varios días, el peso juega un papel importante en el proyecto. Entre menos pesen los crampones, menos será la carga para el usuario y mejor será la aceptación de éstos entre los usuarios. Se le da un peso del 30% por la gran importancia que tiene el peso en los equipos de escalada y montañismo.

Para las pruebas de laboratorio no se fabricó el par completo de cada *Prototipo* sino un sólo ejemplar para evitar costos innecesarios. De acuerdo a esto, se presenta la siguiente tabla con los costos totales de cada uno de los *Prototipos*, su peso y carga de compresión aplicada en la universal.

Tabla 11. Costos, peso y carga de los 3 *Prototipos*

	PROTOTIPO 1	PROTOTIPO 2	PROTOTIPO 3
PESO (g)	222,9	531,86	233,36
CARGA (KN)	16	16	16
CORTE PLASMA	\$ 16.530	\$ 40.890	\$ 29.580
TRAT. TÉRMICO	\$ 8.333	\$ 8.333	\$ 8.333
MATERIAL	\$ 10.000	\$ 10.000	\$ 10.000
OTROS	\$ 1.000	\$ 4.000	\$ 1.000
COSTO TOTAL	\$ 35.863	\$ 63.223	\$ 48.913
% COSTO TOTAL	24,23%	42,72%	33,05%

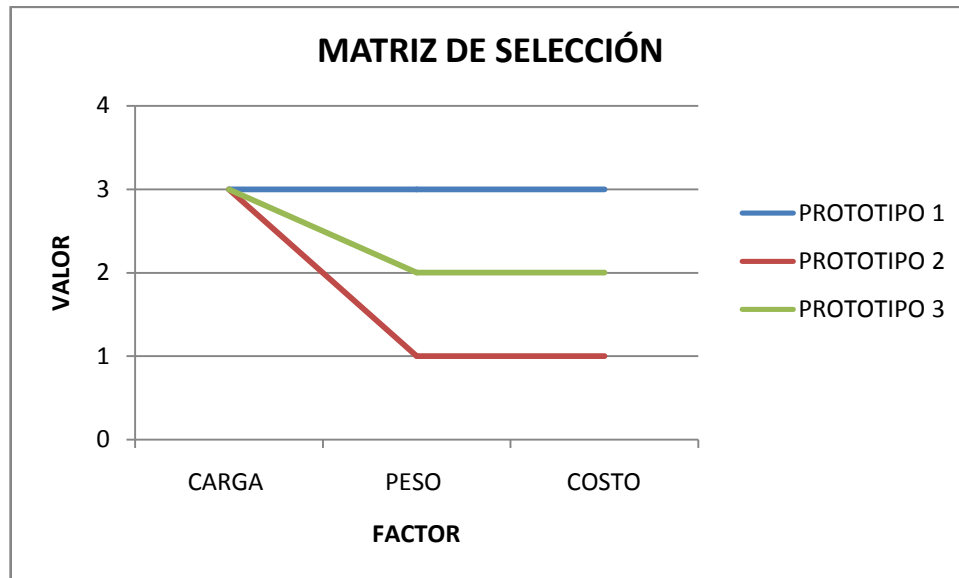
De acuerdo a esta tabla, se puede observar que en cuanto a peso, el más liviano es el *Prototipo 1* al igual que el más económico. En cuanto a resistencia, los 3 *Prototipos* resistieron una carga de compresión de 16KN y no se pudo determinar la carga máxima admisible por motivos de seguridad.

Con estos resultados se pasa a la matriz de selección para escoger el *Prototipo Final*.

Tabla 12. Matriz de selección

MATRIZ DE SELECCIÓN				
FACTOR	VALOR	PROTOTIPO 1	PROTOTIPO 2	PROTOTIPO 3
CARGA	40%	3	3	3
PESO	30%	3	1	2
COSTO	30%	3	1	2
TOTAL	100%	3,00	1,80	2,40

Ilustración 40. Gráfica de matriz de selección



De acuerdo a la matriz de selección, el *Prototipo Final* es el *Prototipo 1*. Como se observa en la gráfica, este *Prototipo* es el mejor en cuanto a peso y costo, y su resistencia aparente es igual a la de los otros dos *Prototipos*.

El *Prototipo 3* a pesar de ser muy parecido al 1, presenta un mayor costo por tener más piezas y un peso mayor por la soldadura. Su resistencia es muy buena al igual que los demás *Prototipos*.

De acuerdo a esta selección, el *Prototipo Final* será sometido a las pruebas de campo en nieve para analizar su comportamiento bajo condiciones reales. Por cumplir los 3 aspectos buscados (bajo peso, bajo costo y alta resistencia), este *Prototipo* no requiere de un rediseño, será el mismo *Prototipo 1* diseñado. A continuación se presenta la tabla de costos del *Prototipo Final*.

Tabla 13. Costos totales del *Prototipo Final*

COSTOS POR PAR	
Material (Acero 1070)	\$ 17.500
Corte por Plasma	\$ 17.500
Tratamiento Térmico	\$ 6.250
Cromado	\$ 16.000
Tornillo/tuerca/arandela	\$ 1.000
Correas y aros	\$ 6.000
Cocido de Correas	\$ 6.250
TOTAL	\$ 64.250

Como se puede ver en la tabla 13, el proyecto cumplió con el objetivo de fabricar unos crampones a un bajo costo. Como referencia se toman las marcas de crampones seleccionadas en el estado del arte, los cuales oscilan entre US\$129.95 – US\$199.95 (Tasa de cambio \$1.796.29), o sea entre \$233.427,89 – \$359.168,19.

La construcción del *Prototipo Final* costó 27.53% del costo del crampón más económico que se analizó en el estado de arte. Este es un gran logro, resultando en una posible fabricación del *Prototipo Final* a un costo de \$100.000 - \$110.000 para recibir alguna ganancia y representando igualmente un ahorro del 50% con respecto a un modelo comercial.

En cuanto a peso, el *Prototipo Final* también resultó en un gran logro, pesando un total de 533 gr, 72 gr menos que el modelo más liviano analizado en el estado del arte. En la tabla a continuación se presenta una comparación de precio y peso del *Prototipo Final* con los modelos analizados en el estado del arte

Tabla 14. Comparación precio-peso

MODELO	PRECIO US\$	PRECIO \$	PESO (gr)	# DE PUNTAS
Black Diamond Contact Strap	\$129,95	\$ 233.427,89	880	10
C.A.M.P. USA Universal XLC	\$139,95	\$ 251.390,79	605	12
Black Diamond Sabretooth Pro Step-In	\$169,95	\$ 305.279,49	970	12
Petzl Charlet Sarken Leverlock	\$189,95	\$ 341.205,29	1010	14
Black Diamond Cyborg Pro Step-In	\$199,95	\$ 359.168,19	1120	12
PROTOTIPO FINAL	\$35,77	\$ 64.250,00	533	12
TRM Dólar \$1.796.29				

A continuación se presentan las fotos del *Prototipo Final*. Para la prueba de campo se construyeron 4 pares para poder ser probados simultáneamente por varias personas y tener resultados y recomendaciones de todas ellas.

Ilustración 41. *Prototipo Final*



Ilustración 42. *Prototipo Final* acomodado a 3 botas diferentes



En la ilustración 42 se puede observar la versatilidad del *Prototipo Final* acomodándose a 3 tipos de botas diferentes. El sistema de correas y el sistema de ajuste de tamaño de bota le permite tanto acomodarse a diferentes tallas como a diferentes modelos de botas.

4.6. PRUEBAS DE CAMPO

Las pruebas de campo se realizaron en el Nevado de Santa Isabel, ubicado en el límite de los departamentos de Caldas, Risaralda y Tolima. La prueba consistió en hacer cumbre (ascender hasta el punto más alto de la montaña o nevado) en dicho nevado.

El ascenso y descenso a la cumbre representó una caminata sobre hielo, nieve y roca (ver las siguientes 3 ilustraciones) de aproximadamente 4 horas en temperaturas bajo cero. Se probaron dos pares del *Prototipo Final* para hacer un análisis completo con dos usuarios diferentes.

Ilustración 43. *Prototipo Final* apoyado sobre la nieve



La mayor parte del ascenso se hizo sobre nieve como se puede observar en la ilustración 43. Esta caminata sobre hielo expone a todo el marco y a las puntas a temperaturas bajo cero.

Ilustración 44. *Prototipo Final* apoyado sobre hielo



La caminata sobre hielo, como se observa en la ilustración 44, puso a prueba la resistencia de las puntas ante impactos directos a éstas.

Ilustración 45. *Prototipo Final* apoyado sobre roca



Aproximadamente 1 hora después de empezar el ascenso por nieve surgió un problema. La tuerca mariposa de uno de los crampones se soltó, pero afortunadamente, esto no causó ningún accidente. Inmediatamente se volvió a ajustar y el ascenso continuó. Este problema demuestra que aunque la idea de la tuerca mariposa implica una facilidad de ajuste y desajuste, representa un gran peligro. Debido a esto, es mejor reemplazar la tuerca mariposa por una tuerca de seguridad para garantizar la sujeción firme de las partes durante todo el recorrido.

Superado este inconveniente, se continuó ascendiendo por la nieve hasta llegar a una pared de nieve-hielo y roca para ascender los últimos metros a la cumbre. En este punto se pusieron a prueba las puntas delanteras durante el ascenso y las puntas traseras durante el descenso. A pesar de que la pared tenía una

gran inclinación, la firmeza de los crampones garantizaron la seguridad de los usuarios (ver las siguientes dos ilustraciones).

Ilustración 46. Prueba de puntas delanteras



La ilustración 46 muestra la inclinación del tramo final antes de la cumbre, exponiendo las puntas frontales a su mayor prueba.

Ilustración 47. Pruebas de puntas traseras



Después de ascender por la pared inclinada, se tuvo que descender por esta misma pared, exponiendo las puntas traseras a contacto directo con rocas como se observa en la ilustración 47. A continuación, se observan fotos de la prueba de campo en general.

Ilustración 48. Prueba de campo



Como se puede observar en las fotos anteriores, la prueba de campo comprobó la resistencia de los crampones no sólo a los contactos con roca y hielo sino también a las bajas temperaturas. El material no sufrió ninguna cristalización y mantuvo su resistencia bajo estas temperaturas extremas. Su comportamiento fue satisfactorio ante la caminata en nieve y los impactos con piedras al no sufrir deformaciones o fracturas.

Sin embargo, a pesar de esta gran resistencia demostrada, el cromado de las piezas resultó ineficiente. Por ser un cromado superficial, el constante contacto con rocas removió parte de este recubrimiento (ver ilustración a continuación). Esto implica que con un uso constante, todo el cromado será removido y los crampones estarán expuestos a la oxidación. Debido a esto, se debe cambiar el cromado por otro tipo de protección contra la abrasión que no se desgaste con el contacto.

Ilustración 49. Desgaste del cromado



A pesar del desgaste del cromado superficial, en general, la prueba de campo confirmó los resultados de las pruebas de laboratorio. El material y diseño escogidos resistieron los impactos, cargas, fatiga y temperaturas bajo cero a las que estuvieron expuestas.

Las pruebas de campo también permitieron tener contacto con montañistas experimentados que al enterarse del proyecto se mostraron muy interesados y aunque no todos tuvieron la oportunidad de ensayar los crampones, su experiencia con equipo de montaña les permitió opinar y dar recomendaciones acerca del proyecto.

4.7. COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES DE EXPERTOS

Según Roberto “Paiton” Ariano, funcionario del Parque Nacional Natural Sierra Nevada del Cocuy y montañista experimentado, “Los crampones se sienten muy sólidos y están muy livianos. La única sugerencia es ponerle el sistema de ajuste en la pieza trasera y fijarla un poco más para que no genere movimiento hacia los lados”.

Waldo Andrés Sepúlveda, guía de alta montaña nativo de Güicán, en la Sierra Nevada del Cocuy dijo: “Los crampones se ven y se sienten muy sólidos y resistentes. Son tan livianos que parecen hechos de aluminio. Creo que al bajo costo que se pueden vender habríamos varios guías de Güicán y El Cocuy que estaríamos interesados en comprarlos”.

Mark, un español montañista aficionado que se encontraba en el Parque Nacional de los Nevados comentó “Las puntas parecen estar más afiladas de lo normal. Además están muy largas, lo cual puede provocar una torcedura de tobillo en caso de pararse en una roca o hielo sólido. Otra cosa es que las correas están en contacto directo con la nieve. Esto puede ser un problema en caso de que no haya nieve sino hielo, el cual puede terminar cortándolas. Además de estos detalles, parece ser una buena idea y el bajo costo me parece muy favorable”.

“Los crampones se comportaron muy bien en el ascenso a cumbre. La estructura es muy sólida y esto se comprobó al tener contacto con roca, hielo y nieve. El poco peso me parece una gran ventaja con respecto a los crampones comerciales de menor costo a los que tenemos acceso. El pero que les vi fueron las correas. En las bajas temperaturas y con guantes puestos resulta muy difícil acomodarlas y ajustarlas. Se podría modificar el sistema de ajuste de correas y ponerle algo más práctico y manejable. Sin embargo, me pareció una

excelente idea y una buena oportunidad para nosotros los montañistas que nos vemos limitados por los altos costos de los equipos. La idea de pensar en que el proyecto puede beneficiar a guías locales me parece muy social y consciente”, dijo Felipe Echeverry, guía de alta montaña del Parque Nacional de los Nevados.

5. CONCLUSIONES

Se diseñaron y construyeron tres *Prototipos* de crampones livianos, económicos y cuya resistencia fue comprobada por medio de análisis de elementos finitos, pruebas de laboratorio y pruebas de campo.

Los *Prototipos 1 y 3* fueron diseñados y contruidos de acero de acuerdo a modelos comerciales clásicos, de 12 puntas, correas y puntas frontales mixtas. El *Prototipo 2* fue diseñado y construido también de acero, 12 puntas y correas, pero de acuerdo a modelos comerciales de caja y puntas frontales horizontales.

Se realizaron 4 pruebas de cargas diferentes que fueron analizadas por medio de elementos finitos. Estas se hicieron para probar la resistencia de las puntas y del crampón al ser sometido a cargas estáticas, tanto horizontales como verticales. La prueba confirmó la solidez de los 3 *Prototipos* al no exceder los esfuerzos de fluencia del material.

Los *Prototipos* diseñados y contruidos fueron sometidos a 3 pruebas de laboratorio para analizar su comportamiento frente a diferentes fuerzas tanto estáticas como dinámicas. Fue realizada una prueba de compresión en la Máquina Universal de la Universidad EAFIT que demostró la gran resistencia de los 3 *Prototipos* al soportar una carga estática de 16 KN sin presentar falla alguna. Las puntas frontales y traseras fueron probadas con una carga de 95 Kg que soportaron sin presentar ningún tipo de deformación o fractura. La última prueba se realizó con una carga dinámica, ejecutada por medio de repetidos saltos en pavimento sin que las puntas se doblaran o fracturaran.

Por medio de una matriz de selección se analizaron los 3 *Prototipos* construidos. Los *Prototipos* resistieron las pruebas de laboratorio, por lo cual no se pudo hacer un descarte por falla prematura. En cuanto a peso y costo, el *Prototipo 1* resultó ser el mejor. En los resultados generales, el *Prototipo 1* ocupó el primer lugar, el *Prototipo 3* el segundo y el *Prototipo 2* el tercero. De acuerdo a estos resultados, el *Prototipo 1* pasó a ser el *Prototipo Final* escogido para la prueba de campo.

La prueba de campo se realizó haciendo cumbre (ascender hasta el punto más alto de un nevado) al Nevado de Santa Isabel, ubicado en el límite de los departamentos de Caldas, Risaralda y Tolima; con una altura de 4965 msnm. En esta prueba, el *Prototipo Final* fue expuesto a temperaturas bajo cero y debido a la diversidad del terreno, se caminó sobre nieve, hielo y roca por más de 4 horas. Los crampones no sufrieron ningún tipo de fractura o deformación ante estas condiciones extremas, confirmando lo encontrado en el análisis de elementos finitos y las pruebas de laboratorio.

6. RECOMENDACIONES

Las fracturas generadas en el doblado de las puntas pueden comprometer la resistencia del *Prototipo Final*. Esto se puede solucionar haciéndole un revenido al material antes de doblarlas. Sin embargo, esto aumentaría tanto el precio como el tiempo de fabricación. Otra posible solución es la fabricación de dados para que el doblado sea menos agresivo y no se generen los impactos constantes del martillado.

Para evitar posibles accidentes, la tuerca mariposa que sujeta la parte delantera y trasera debe ser cambiada por una tuerca de seguridad para garantizar la unión firme de las dos partes. De esta forma, aunque el cambio de longitud del crampón se dificulta, se garantiza la seguridad del usuario.

Debido a que las correas van en contacto directo con la nieve, hielo, o roca, estas pueden sufrir desgaste y reventarse. Se puede analizar alguna forma en que las correas no tengan este contacto directo con algún protector o algún cambio en el diseño.

Las puntas pueden ser recortadas aproximadamente 1-1.5cm. Esto se debe a que puntas tan largas pueden provocar torceduras de tobillos al apoyarse en rocas o hielo sólido. Al recortarlas, no sólo se están evitando posibles accidentes sino también reduciéndole peso al modelo.

El punto de sujeción de las dos piezas puede ser cambiado para la pieza trasera. De esta forma, la cabeza del tornillo quedará en el puente del zapato sin tener contacto directo con la suela.

Al *Prototipo Final* se le puede dar una previa curvatura para que se ajuste mejor a la forma del zapato. Haciendo esto, se evitará el esfuerzo generado por el doblado del *Prototipo* al ser ajustado al zapato.

Debido a los impactos con rocas y hielo al que están sometidos los crampones, un recubrimiento superficial como el cromado no resultó ser una buena idea. Se puede analizar la posibilidad de construirlos en acero inoxidable o no hacerles el cromado y dejarlos expuestos al óxido asegurándose de tener un buen cuidado de estos limpiándolos, lubricándolos y protegiéndolos de la corrosión cada vez que se utilicen.

BIBLIOGRAFÍA

Aceros-de-LLodio-S.A. 1973. *Tratamientos Térmicos de Herramientas de Acero*. s.l. : Urmo, S.A. de Ediciones, 1973. Primera Edición.

Amstead, B.H., Ostwald, Phillip F. y Begeman, Myron L. 1996. *Procesos de Manufactura*. s.l. : Compañía Editorial Continenta, S.A., 1996. Versión SI.

Apraiz Barrero, José. 1985. *Tratamientos Térmicos de los Aceros*. s.l. : Dossat S.A., 1985. Octava Edición.

Fende-Testas. 2007. Fende-Testas. *Crampones (I): Historia*. [En línea] 17 de Septiembre de 2007. [Citado el: 20 de Septiembre de 2009.] <http://fende-testas.blogspot.com/2007/09/crampones-i-historia.html>.

Groover, Mikell P. 1997. *Fundamentos de Manufactura Moderna. Materiales, Procesos y Sistemas*. s.l. : Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., 1997. Primera Edición .

HERMAC. Medio y Alto Carbono. Flejes de Acero. [En línea] [Citado el: 15 de Septiembre de 2010.] http://www.hermacsa.com.ar/fleje_acero_alto.php.

López, Jaime Espinoza. 2009. Tadoo adventure gear. *Tadoo adventure gear*. [En línea] mayo de 2009. [Citado el: 20 de septiembre de 2009.] <http://co.tadoo.ws/posts/node?id=839>.

Martínez Gómez, Lorenzo. 1997. *Acero*. s.l. : Fondo de Cultura Económica, 1997. Segunda Edición.

MATWEB. AISI 1070 Steel, cold drawn, spheroidized, annealed, 19-32 mm (0.75-1.25 in) round . [En línea] [Citado el: 15 de Agosto de 2010.] <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=721bc07081ea4022ae9825ee57b1dda4&ckck=1>.

Poindexter, Joseph. 1998. *To the summit*. Nueva York : Black dog & Leventhal publishers, 1998.

REI(a). 2010. Black Diamond Contact Strap Crampons with ABS Plates. [En línea] 2010. [Citado el: 11 de Octubre de 2010.] <http://www.rei.com/product/798354>.

REI(b). 2010. Black Diamond Cyborg Pro Step-In Crampons with ABS Plates. [En línea] 2010. [Citado el: 11 de Octubre de 2010.] <http://www.rei.com/product/792589>.

REI(c). 2010. Black Diamond Sabretooth Pro Step-In Crampons with ABS Plates. [En línea] 2010. [Citado el: 11 de Octubre de 2010.] <http://www.rei.com/product/792590>.

REI(d). 2010. C.A.M.P. USA Universal XLC 490 Crampons. [En línea] 2010. [Citado el: 11 de Octubre de 2009.] <http://www.rei.com/product/751754>.

REI(e). 2010. Petzl Charlet Sarken Leverlock Crampons. [En línea] 2010. [Citado el: 11 de Octubre de 2010.] <http://www.rei.com/product/782450>.

Soro, Michel. 2008. Silicia. *Silicia*. [En línea] 2008. [Citado el: 8 de septiembre de 2009.] www.silicia.com/monte/crampones.asp.

Uterweiser, Paul M., Boyer, Howard E. y Kubbs, James J. 1982. *Heat Treater's Guide*. s.l. : American Society for Metals, 1982.

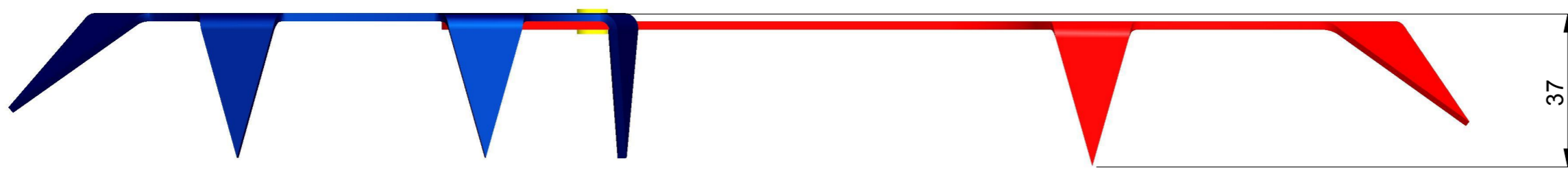
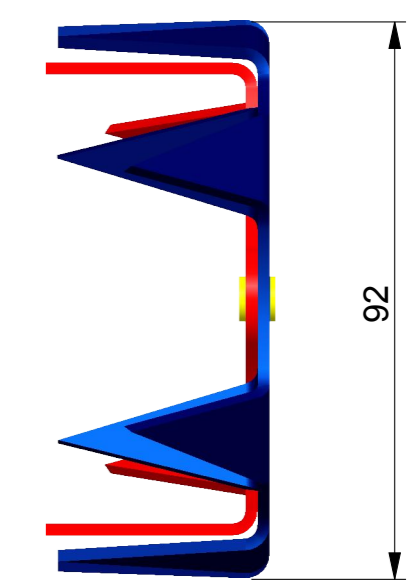
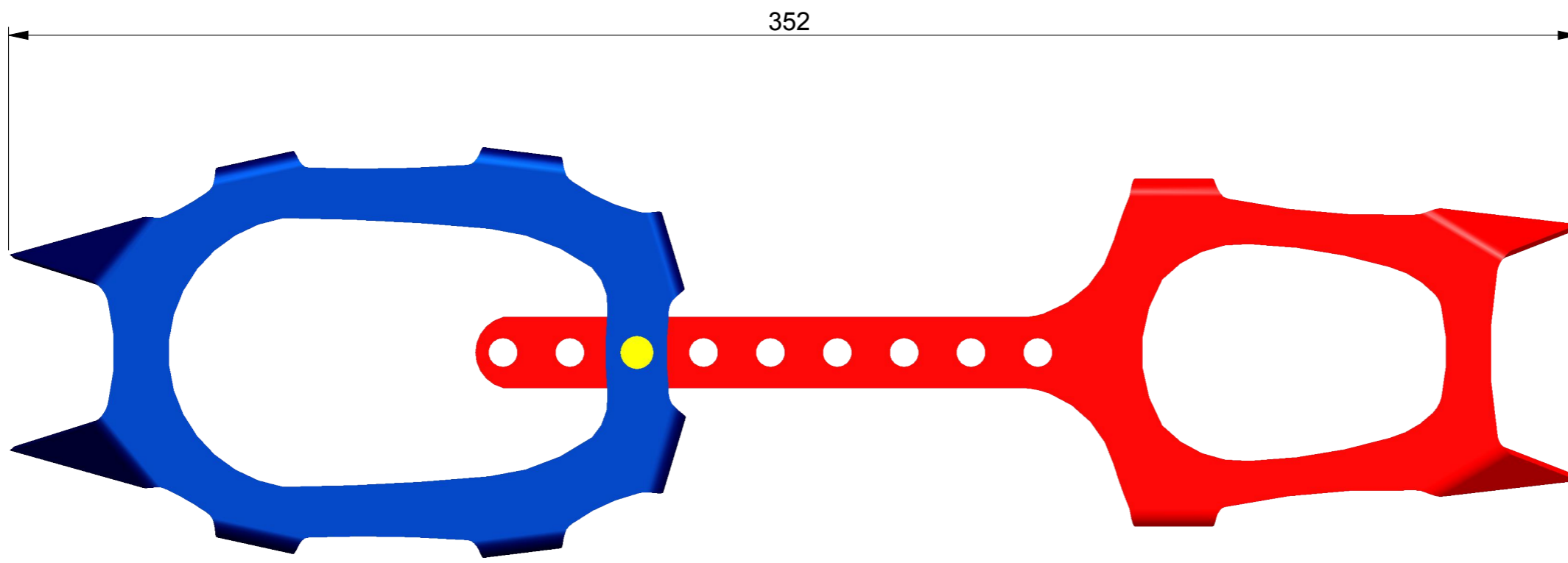
Valencia Giraldo, Adrúbal. 1994. La Importancia del Diseño en el Tratamiento Térmico. [aut. libro] SIMEDUA. *Segundo Encuentro Nacional Sobre Tratamientos Térmicos*. Medellín : s.n., 1994.

Wolf (b), Der Einsame. 2009. Der Einsame Wolf. *Historia del Crampon*. [En línea] 9 de mayo de 2009. [Citado el: 10 de septiembre de 2009.] <http://einsamewolf.blogspot.com/2009/05/historia-de-los-crampones.html>.


Wolf. 2009. Guía sobre crampones I: Modelos y características. *Guía sobre crampones I: Modelos y características*. [En línea] 20 de mayo de 2009. [Citado el: 27 de septiembre de 2009.] <http://einsamewolf.blogspot.com/2009/05/guia-sobre-crampones-i-modelos-y.html>.

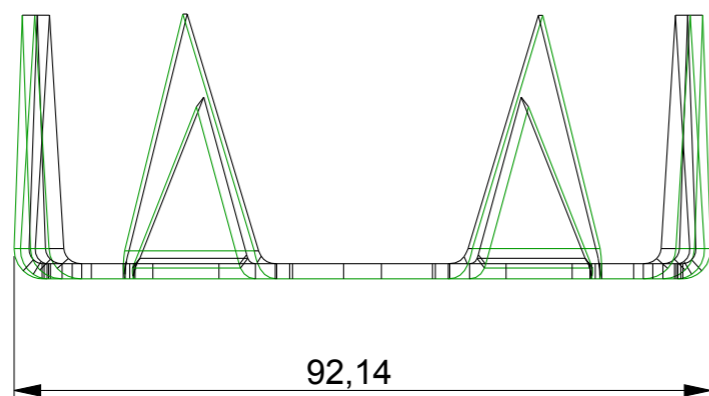
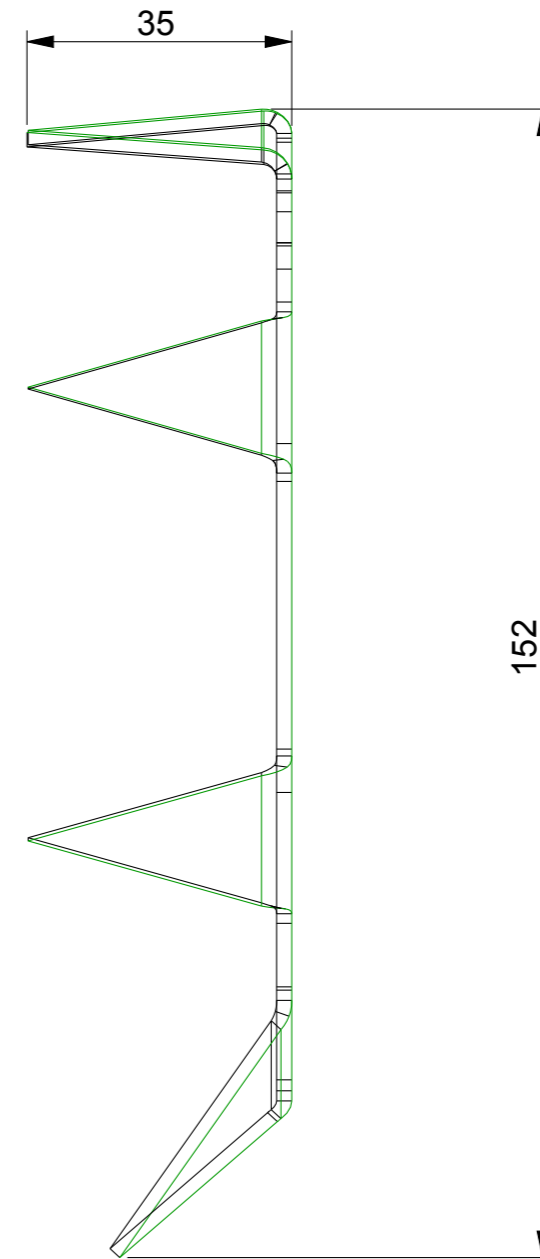
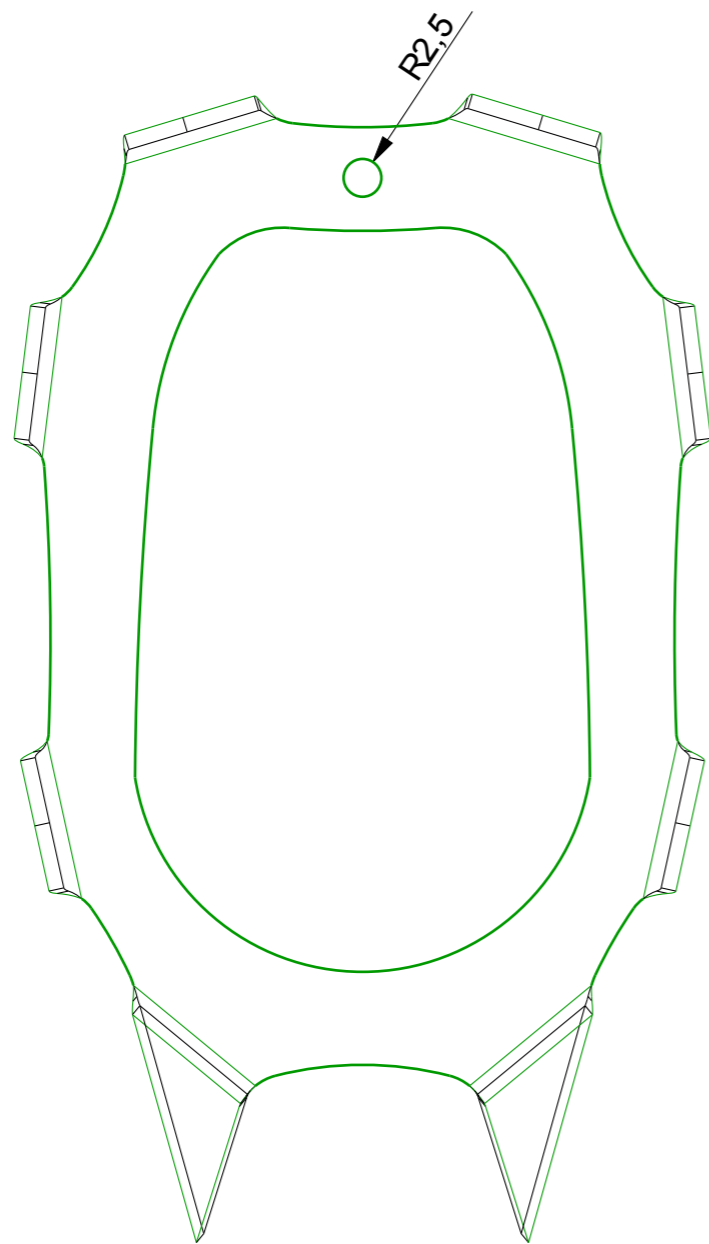
PLANOS

A continuación se presentan los planos del *Prototipo Final*.




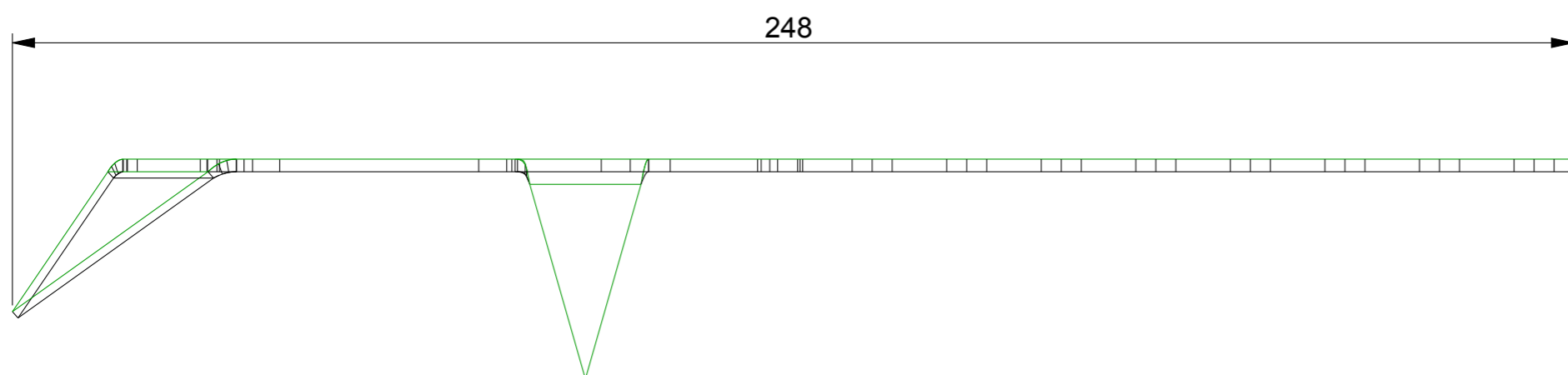
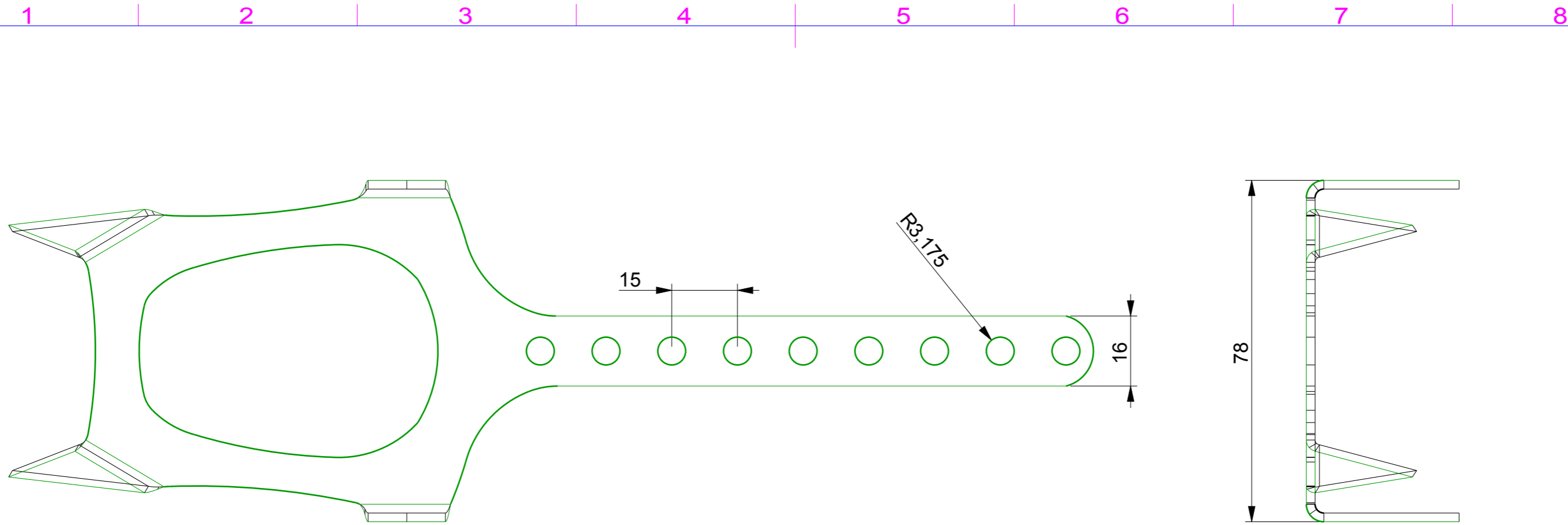
SCALE 0,800

MATERIAL AISI 1070	FECHA Diseño SEPTIEMBRE 2010 DANIEL GÓMEZ G.	UNIVERSIDAD EAFIT Carrera 49 - 7 Sur 50 | Medellín - Colombia - Suramérica	
A MENOS QUE SEA ESPECIFICADO DIMENSIONES ESTAN EN MM		Plano 18-Oct-10 DANIEL GÓMEZ G.	TITULO PROTOTIPO FINAL
PLANO No : 3	TOLERANCIAS		PRO/E DRAW FILE ENSAMBLE
 FORMATO ISO A	0,0	±0,15	REV
	0,00	±0,05	
INGENIERIA MECÁNICA	ANG	± 1	FORM A3 ESCALA 0,250 HOJA 1 OF 1




SCALE 1,000

MATERIAL AISI 1070	FECHA DISEÑO: SEPTIEMBRE 2010 DANIEL GÓMEZ G.	UNIVERSIDAD EAFIT Carrera 49 - 7 Sur 50 | Medellín - Colombia - Suramérica	
A MENOS QUE SEA ESPECIFICADO DIMENSIONES ESTAN EN MM	Plano 12-Oct-10 DANIEL GÓMEZ G.	TITULO PARTE DELANTERA	
PLANO No : 1	TOLERANCIAS	PRO/E DRAW FILE PARTE_DELANTERA	REV
 FORMATO ISO A	0,0	±0,15	
	0,00	±0,05	
INGENIERIA MECÁNICA	ANG	± 1	FORM A3 ESCALA 0,500 HOJA 1 OF 1



SCALE 1,000

MATERIAL AISI 1070	FECHA Diseño SEPTIEMBRE 2010 DANIEL GÓMEZ G.	UNIVERSIDAD EAFIT Carrera 49 - 7 Sur 50 | Medellín - Colombia - Suramérica	
A MENOS QUE SEA ESPECIFICADO DIMENSIONES ESTAN EN MM	Plano 12-Oct-10 DANIEL GÓMEZ G.	TITULO PARTE TRASERA	
PLANO No : 2	TOLERANCIAS		
 FORMATO ISO A	0,0	±0,15	PRO/E DRAW FILE PARTE_TRASERA
	0,00	±0,05	
INGENIERIA MECÁNICA	ANG	± 1	REV
		FORM A3 ESCALA 0,333 HOJA 1 OF 1	