

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**VICTOR HENRIQUE JAVARA**

**ANÁLISE DA JUNTA SOLDADA NA UNIÃO DA ESTRUTURA DO  
VEÍCULO BAJA SAE**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**GUARAPUAVA**

**2017**

**VICTOR HENRIQUE JAVARA**

**ANÁLISE DA JUNTA SOLDADA NA UNIÃO DA ESTRUTURA DO  
VEÍCULO BAJA SAE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Msc. Henrique Ajuz Holzmann

**GUARAPUAVA**

**2017**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Guarapuava  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Coordenação de Engenharia Mecânica  
Engenharia Mecânica



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**ANÁLISE DA JUNTA SOLDADA NA UNIÃO DA ESTRUTURA DO VEÍCULO BAJA  
SAE**

por

**VICTOR HENRIQUE JAVARA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 27 de junho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Msc. Henrique Ajuz Holzmann  
Prof. Orientador

---

Prof. Maurício Daniel Marczal  
Membro Titular

---

Msc. Wellington Uczak de Goes  
Membro Titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho à minha família, que  
com amor e dedicação, sempre me  
apoiou e incentivou.

## **AGRADECIMENTOS**

Meus sinceros agradecimentos:

A Deus, pelo fim de mais essa etapa.

Aos meus pais Genésio e Graça pela oportunidade e incentivo de tornar esse sonho realidade.

À minha irmã Letícia, pelo companheirismo, amizade e apoio.

Aos meus avós.

À minha namorada Aline Montanher Polizel, por todo apoio, carinho e por ter me acompanhado durante essa trajetória da minha vida.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela formação profissional e concessão da bolsa auxílio.

Ao meu orientador, Henrique Ajuz Holzmann, pelo empenho, incentivo, paciência e amizade, que tornaram possível a elaboração deste trabalho.

Ao Técnico de Laboratório/Mecânica, Lucas Franco Wrege, por todo apoio ao longo das atividades e auxílio nas análises laboratoriais.

Aos professores Maurício Daniel Marczał e Wellington Uczak de Goes, pelas sugestões e correções.

Aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado nesta caminhada desde o início.

O meu muito obrigado.

## RESUMO

JAVARA, Victor Henrique. **Análise da junta soldada na união da estrutura do veículo Baja SAE**. 2017. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2017.

O campeonato Baja SAE está em crescente visibilidade mundial, com isso a importância das modificações e aprimoramentos torna-se crucial para diferenciar-se. Diversos estudos são realizados em torno do veículo Baja SAE, desses destacam-se estudos de melhorias de projeto, estudos de projeto em si e estudos que comprovam a segurança e qualidade do projeto. A gaiola do veículo Baja é de estrita importância para a segurança do piloto em casos de choques mecânicos do veículo durante as competições. Para a sua fabricação é utilizado o processo de soldagem na união dos tubos, este ocasiona a perda local das propriedades mecânicas do material, fenômeno denominado de Zona Termicamente Afetada (ZTA), tornando de grande importância as análises mecânicas exercidas sobre esta. Visando comprovar a qualidade da fabricação da gaiola, este trabalho tem como objeto de estudo corpos de prova simulando pontos de união da gaiola a serem verificados através de ensaios mecânicos destrutivos e não destrutivos.

**Palavras-chave:** Baja. SAE. Soldagem. Ensaios Mecânicos. Gaiola. ZTA.

## ABSTRACT

JAVARA, Victor Henrique. **Welded join union analysis of Baja SAE vehicle structure**. 2017. 58 f. Term Paper, Bachelor degree in Mechanical Engineer - Federal University of Technology- Paraná. Guarapuava, 2017.

The Baja SAE championship is growing day by day all over the world, thus, studies are necessary for modification and upgrading as a differential at engineering. Several improvement studies about Baja SAE vehicle are performed for example studies about design, design improvements and studies that prove safety and quality of the project. The roll cage is extremely important for the safety of the pilot in case of mechanical shocks during competitions. It is used a welding process at the tube joints for the cage manufacturing. This process causes damage of mechanical properties of the material, this phenomenon is called Heat Affected Zone (HAZ). Trying to prove the roll cage manufacturing quality, this term paper has as study object proof bodies for simulation of roll cage joints to be checked through destructive and nondestructive mechanical testing.

**Keywords:** Baja. SAE. Welding. Mechanical Testing. Roll Cage. HAZ.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplos aceitáveis de Pontos de Reboque Dianteiro.....	10
Figura 2 - Vista lateral da gaiola Baja.....	13
Figura 3 - Vista isométrica da gaiola do Baja .....	13
Figura 4 - Processos de Soldagem .....	15
Figura 5 - Representação do arco elétrico .....	16
Figura 6 - Processo de Soldagem MIG/MAG .....	17
Figura 7 - Perfil geométrico de um cordão de solda.....	17
Figura 8 - Efeito de alterações nos parâmetros de soldagem na geometria de cordões de solda. ....	18
Figura 9 - Regiões de uma junta soldada: (1) zona fundida; (2) zona de ligação; (3) zona de ligação; (3) zona termicamente afetada e (4) metal base.....	19
Figura 10 - Corpo de prova usualmente utilizados para ensaios de tração.....	21
Figura 11 - Gráfico Tensão x Deformação .....	22
Figura 12 - Escalas comparativas entre os valores de vários métodos de durezas. .	23
Figura 13 - Gráfico Limite de Resistência à Tração x Dureza Brinell .....	25
Figura 14 - Sequência do ensaio com líquidos penetrantes.....	26
Figura 15 - Micrografia do aço SAE 1020 – ataque Nital a 2% - 160 X.....	28
Figura 16 - SAE 1020 - Região mais distante da ZTA (estrutura: grãos pardos Perlita + grãos claros Ferrita, ataque Nital 2%, 160 X).....	29
Figura 17 - SAE 1020 - Região na interface da ZTA (estrutura: grãos pardos Perlita + grãos claros Ferrita, ataque Nital 2% 160 X).....	29
Figura 18 - SAE 1020 - Região da zona de fusão do metal depositado por arco elétrico (estrutura de ferrita alotriomórfica nos contornos de grãos, ferrita acicular e perlita fina - ataque Nital 2% 160 X).....	30
Figura 19 - Corte tipo "boca de lobo" realizada em 90° - Vistas: isométrica, inferior e frontal .....	31
Figura 20 - Corpos de prova utilizados no ensaio da dureza .....	33
Figura 21 - Efeito do níquel, cromo e manganês sobre as propriedades mecânicas do aço de baixo e médio carbono .....	38
Figura 22 - Amostra do cordão de solda embutido em baquelite .....	40
Figura 23 - Análise com líquidos penetrantes após aplicação do revelador.....	41
Figura 24 - Micrografia com ampliação de 20 X do Metal Base .....	44
Figura 25 - Micrografia com ampliação de 5 X do cordão de solda.....	45
Figura 26 - Micrografia com ampliação de 20 X do cordão de solda.....	45
Figura 27 - Micrografia com ampliação de 5 X da Zona Termicamente Afetada.....	46
Figura 28 - Micrografia com ampliação de 20 X da Zona Termicamente Afetada.....	47



## LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

C	Carbono
c	Distância entre a linha neutra e o ponto mais externo da peça
cm	Centímetros
CVT	Continuously variable transmission
D	Diâmetro Externo do tubo
d	Diâmetro interno do tubo
E	Módulo de Elasticidade
ECPA	Esporte Clube Piracicabano de Automobilismo
$I_x$	Momento de área em relação ao eixo x
kg	Quilograma
lbf	Libra-força
lb	Libra
LRT	Limite de Resistência à Tração
MB	Metal Base
$M_f$	Momento Fletor
mm	Milímetro
Mn	Manganês
MPa	Mega Pascal
pol.	Polegada
RBSB	Regulamento Baja SAE Brasil
$S_y$	Resistência ao escoamento
SAE	Society of Automotive Engineers
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona termicamente afetada

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	8
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
1.3 JUSTIFICATIVA.....	8
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>10</b>
2.1 REGULAMENTO BAJA SAE BRASIL.....	10
2.1.1 Configuração do veículo .....	11
2.1.2 Dimensões máximas do veículo .....	11
2.1.3 Capacitação para o terreno .....	11
2.1.4 Requisitos da Gaiola.....	12
2.2 SOLDAGEM.....	15
2.2.1 Soldagem a Arco Elétrico .....	16
2.2.2 Soldagem MIG/MAG.....	16
2.3 CORDÃO DE SOLDA .....	17
2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS JUNTAS SOLDADAS.....	19
2.5 ENSAIOS MECÂNICOS .....	20
2.5.1 Ensaio Destrutivo: Ensaio de Tração.....	20
2.5.2 Ensaio de Dureza .....	22
2.5.3 Ensaio Metalográficos.....	25
2.5.4 Ensaio Não Destrutivo: Ensaio por Líquidos Penetrantes.....	26
2.5.5 Ensaio Não Destrutivo: Inspeção Visual .....	27
2.6 CARACTERIZAÇÃO DO AÇO SAE 1020.....	27
2.6.1 Caracterização do Aço SAE 1020 - Pós Soldagem .....	28
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>31</b>
3.1 DELIMITAÇÃO DOS MATERIAIS A SEREM UTILIZADOS.....	31
3.2 PROCESSO DE SOLDAGEM .....	31
3.3 PROCESSOS DE INSPEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	32
3.3.1 Inspeção visual .....	32
3.3.2 Ensaio por Líquidos Penetrantes .....	33
3.3.3 Ensaio de Dureza .....	33
3.3.4 Ensaio Metalográfico .....	34
3.3.5 Ensaio de Tração.....	35
3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	35
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>37</b>
4.1 ANÁLISE GEOMÉTRICA DO CORDÃO DE SOLDA.....	40
4.2 ENSAIOS MECÂNICOS .....	41
4.2.1 Ensaio por Líquidos Penetrantes.....	41
4.2.2 Ensaio de Dureza .....	42

4.2.3 Ensaio Metalográfico .....	44
4.2.4 Ensaio de Tração.....	47
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A competição Baja SAE teve início em 1976 na Universidade da Carolina do Sul, Estados Unidos, sob a direção do Dr. J.F Stevens. No Brasil as atividades deram início em 1991, sendo que em 1994 o Projeto Baja SAE Brasil foi lançado. No ano seguinte se realizou a primeira competição nacional, em São Paulo. Atualmente a competição é realizada em Piracicaba, interior de São Paulo, no ECPA - Esporte Clube Piracicabano de Automobilismo (BAJA SAE BRASIL, 2016).

O projeto dos Bajas vêm sendo aprimorado não somente para as competições, mas também na área de inovações tecnológicas, trazendo um impacto a sociedade. Exemplos disto são as estratégias desenvolvidas por algumas equipes que ao estudar, identificaram a possibilidade de substituição de materiais buscando uma diminuição de peso, e com isso ganhando aceleração, velocidade e dirigibilidade (PORTAL FATOR BRASIL, 2016). A equipe Hidro Baja FAHOR, inovou quando substituiu o modelo de transmissão CVT (Transmissão Continuamente Variável) por transmissão de potência hidráulica, acarretando em ganho de agilidade e menor dissipação de energia (HIDRO BAJA FAHOR, 2016).

A estrutura do veículo Baja é constituída basicamente por tubulação de aço SAE 1018, dobrados e ligados por meio de juntas soldadas (conforme regulamentação da competição Baja SAE Brasil). O chassi do veículo Baja tem o intuito de proporcionar segurança ao piloto, sendo restrita a presença de cantos vivos ou falhas nítidas, os quais serão avaliados pelos juízes da competição. O veículo deverá ser capaz de receber todos seus subsistemas, como pedais, volante, suspensão e eixos. Antes da fabricação, realiza-se um projeto da estrutura, obedecendo as normas vigentes na competição.

O processo de soldagem comumente empregado na estrutura BAJA, gira em torno da solda através de eletrodo revestido, MIG/MAG (*Metal Inert Gas, Metal Active Gas*) ou TIG (*Tungsten Inert Gas*). Estudar a junta gerada se torna de grande importância, visto que nesta região ocorre um acúmulo de tensões e se torna pontos propícios ao início de falhas.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a junta soldada empregada na união de tubos de Aço SAE 1020 e verificar a viabilidade de uso na fabricação da estrutura do veículo Baja.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar ensaios de soldagem nos tubos de aço SAE 1020 em diferentes angulações.
- Analisar a junta soldada, através de ensaios não destrutivos (líquidos penetrantes e inspeção visual).
- Analisar a junta soldada, através de ensaios destrutivos (macro dureza e metalografia).
- Analisar os resultados obtidos.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

As competições de nível nacional como a SAE atraem a atenção de diversos ramos da sociedade, focando na inovação tecnológica envolvida. Inovações como a substituição de acessórios, novas metodologias de projeto e peças inovadoras que visam um benefício particular para a equipe na competição, e que podem ser absorvidas pelo mercado, não só automobilístico, mas em outras áreas diversas.

A competição Baja SAE é severa, principalmente nos requisitos de segurança do piloto, devendo assegurar o não rompimento da estrutura ou chassi em nenhum local. Para garantir a confiabilidade dessa estrutura se faz necessário um projeto estrutural competente, abrangendo desde desenhos da estrutura, como propriedades dos materiais a serem utilizados. Devido aos diversos esforços que o veículo é submetido, e o tempo prolongado dessa exposição, fica clara a importância de um estudo direcionado ao processo de soldagem da estrutura e a influência que a mesma acarreta no restante do conjunto.

Como o método de soldagem da estrutura do veículo não é especificado na norma, abre-se espaço para que seja trabalhado com intuito de buscar uma otimização do mesmo, tanto na parte econômica, quanto na parte estrutural. Esse estudo é essencial para que possa comprovar a eficiência das soluções empregadas no projeto, e através da realização de ensaios e caracterizações mecânicas obter os resultados e gerar laudos a fim de comprovação.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 REGULAMENTO BAJA SAE BRASIL

O regulamento Baja SAE vem passando por diversas modificações e melhorias conforme os anos de existência da competição, muitas dessas mudanças são sugeridas por membros de equipes participantes e também através da análise de campeonatos anteriores e campeonatos internacionais. O regulamento é dividido por capítulos, os quais sofrem atualizações independentes entre si, e são classificados pelo assunto e pela sua data de efetividade.

Analisando o Capítulo 5 da norma 2016 (regulamento revisado e alterado em 08 de Janeiro de 2016, Emenda 3) do Regulamento Baja SAE Brasil (RBSB 5), referente aos requisitos gerais do veículo, obtêm-se as normas reguladoras do veículo, dentre essas, as limitações de comprimento e os detalhes obrigatórios da estrutura. Dos detalhes obrigatórios pode-se destacar a norma regulamentadora de pontos de reboque traseiro e dianteiro como ilustra a Figura 1.



**Figura 1 - Exemplos aceitáveis de Pontos de Reboque Dianteiro**  
**Fonte: Regulamento Baja SAE Brasil, Capítulo 5 (2016).**

Os requisitos gerais do veículo são complementados rigidamente pelo Capítulo 7 (regulamento revisado e alterado 01 Fevereiro de 2012, Emenda 3) do Regulamento Baja SAE Brasil, no que tange aos requisitos mínimos de segurança. Dentro do capítulo 7 existe um tópico voltado às normas que deverão ser seguidas para a construção da gaiola.

Das normas vigentes voltadas diretamente ou parcialmente à estrutura no regulamento, destacam-se a configuração do veículo, dimensões máximas,

capacitação para o terreno, requisitos da *Roll Cage* (gaiola) e dos materiais restritos a sua fabricação.

### 2.1.1 Configuração do veículo

Da norma 5.4 destacam-se a obrigatoriedade do veículo Baja possuir quatro ou mais rodas, onde veículos de três rodas são expressamente proibidos. O veículo deverá suportar peso adicional de 113,4 kg (250 lbs) e pessoas com até 1,90 metros (6 pés 3 pol.) de altura.

### 2.1.2 Dimensões máximas do veículo

A norma 5.5 refere-se às dimensões máximas do veículo, destacando a largura e comprimento máximos na qual o veículo deve ser fabricado, sendo essa a mais restritiva em relação à estrutura da gaiola.

Considerando os pneus voltados para frente do veículo, a largura máxima aceita pela norma 5.5 é de 1,62 metros (64 pol.). Quanto ao comprimento, a medida não possui restrições, sendo válido lembrar que o veículo deverá ser capaz de percorrer os circuitos construídos para os Baja SAE, que se baseiam em protótipos de 2,75 metros de comprimento.

Os veículos com comprimentos superiores poderão ser incapazes de percorrer alguns trechos e cumprirem determinadas provas, se o mesmo não for capaz de competir em todas as provas impostas pela competição a equipe será excluída do evento.

### 2.1.3 Capacitação para o terreno

A norma referente à capacitação ao terreno (norma 5.6), não se refere somente à estrutura do veículo, mas ao veículo como um todo. Dela é determinada que o veículo deverá ser capaz de operar seguramente sobre diversos terrenos, incluindo pedras, areia, troncos de árvore, lama, grandes inclinações ou todas as combinações e em qualquer condição climática.



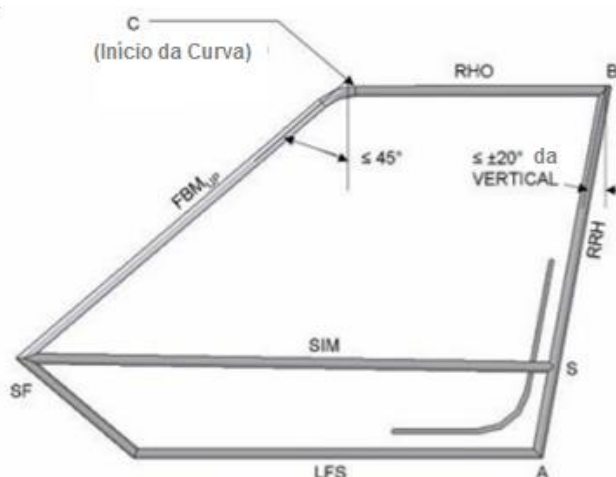
Com a diversidade de terrenos percorridos e conseqüentemente a diversidade de impactos sofridos, tendo como impactos adicionais as colisões entre veículos, capotamentos e colisões frontais do veículo com rampas presentes nos trajetos, a qualidade da estrutura se torna estritamente importante para a segurança do piloto.

#### 2.1.4 Requisitos da Gaiola

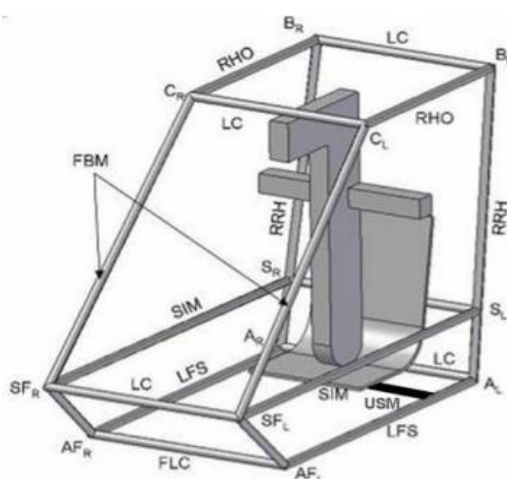
Segundo o Regulamento Baja SAE Brasil, do capítulo 7 referente às normas de segurança do veículo (2012), define-se os requisitos mínimos de segurança que a gaiola deverá conter. O objetivo da gaiola é proporcionar um espaço tridimensional mínimo em torno do condutor. A mesma deve ser projetada e fabricada para não haver falhas na sua integridade e deve ser suficientemente grande para: obter distância de 15,24 centímetros (6 pol.) do capacete do condutor a qualquer dos dois pontos da cabine do piloto (*cockpit*) do carro; e o torso, joelhos, ombros cotovelos mãos e braços do condutor devem estar com folga mínima de 7,62 centímetros (3 pol.) da estrutura do carro. Estas folgas serão avaliadas e julgadas pelos membros organizadores da competição.

Do Regulamento Baja SAE (2012), destacam-se normas como:

- A obrigatoriedade das barras frontais verticais (FBM) serem contínuas de forma única com as barras superiores da gaiola (RHO) conforme mostra a Figura 2, o pé do condutor deve obrigatoriamente estar atrás do plano criado pelos pontos  $AF_{L,R}$  e  $SF_{L,R}$  analisados através da Figura 3, se o tubo  $SF_{R,L}$  se encontrar abaixo do pé do condutor, será necessária uma barra adicional acima dos pés do condutor, na intenção de proteger os pés do condutor do aro do pneu.



**Figura 2 - Vista lateral da gaiola Baja**  
**Fonte: Regulamento Baja SAE Brasil, Capítulo 7 (2012).**



**Figura 3 - Vista isométrica da gaiola do Baja**  
**Fonte: Regulamento Baja SAE Brasil, Capítulo 7 (2012).**

- Dos membros da gaiola, a parede corta-fogo (RPH), estrutura superior (RHO), barras inferiores laterais (LFS), barras frontais verticais (FBM), as barras frontais horizontais (FLC e LC) e qualquer parte em que for anexado os cintos de segurança devem ser constituído de no mínimo: tubo de aço circular com diâmetro externo de 25,4 milímetros (1 pol.), espessura de parede de 3,05 milímetros (0,12 pol.) e um teor de carbono de pelo menos 0,18%, ou membros de aço com pelo menos a mesma rigidez e resistência à flexão do tubo especificado anteriormente, desde que a espessura da parede seja igual ou maior do que 1,57 milímetros (0,062 pol.). Tomando a relação entre a resistência à flexão e a rigidez à flexão com a

inércia, para a realização dos cálculos deverá ser considerado o eixo de menor valor desta.

A rigidez e resistência à flexão devem ser proporcionais aos do aço 1018 ( $S_y=370$  MPa e  $E= 205$  GPa, onde a resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade são denominados por  $S_y$  e  $E$  respectivamente). É de obrigação da equipe, apresentar os cálculos obtidos para os juízes da competição, comprovando as proporções das propriedades mecânicas dos tubos utilizados em relação ao aço 1018.

Segundo a norma de segurança do projeto Baja (2012), qualquer porção das barras cilíndricas entre as juntas soldadas que podem estar em contato com o condutor, devem ser cobertas por material resiliente (Polietileno ou similar) com espessura mínima de 12 milímetros (0,5 pol.). As juntas soldadas devem estar livres de preenchimento de polietileno, é exigida uma abrangência de 25,4 milímetros (1 pol.) no entorno das juntas soldadas para permitir a inspeção da solda.

Do regulamento (2012), o veículo Baja deve conter um apoio de cabeça padrão, com a função de limitar o movimento da cabeça para trás em caso de acidente. Este apoio deve conter uma área mínima de 232 centímetros quadrados e ser preenchido com um material capaz de absorver a energia de impacto (*Ethafoam* ou *Ensolite*). O apoio deve ter uma espessura mínima de 3,8 centímetros (1,5 pol.) e não ser localizado a mais de 2,54 centímetros (1 pol.) de distância a partir do capacete.

Adicionado na última emenda (Emenda 3) do Capítulo 7 do Regulamento (2012), tem-se que o apoio deve ser fixado e montado na estrutura do veículo, sendo suficientemente robusto para absorver as cargas impostas pelo impacto do capacete do piloto em caso de acidente. Como referência para o projeto, o apoio deve ser capaz de suportar uma força mínima de 890 Newtons na direção normal à superfície de contato com o capacete do piloto.

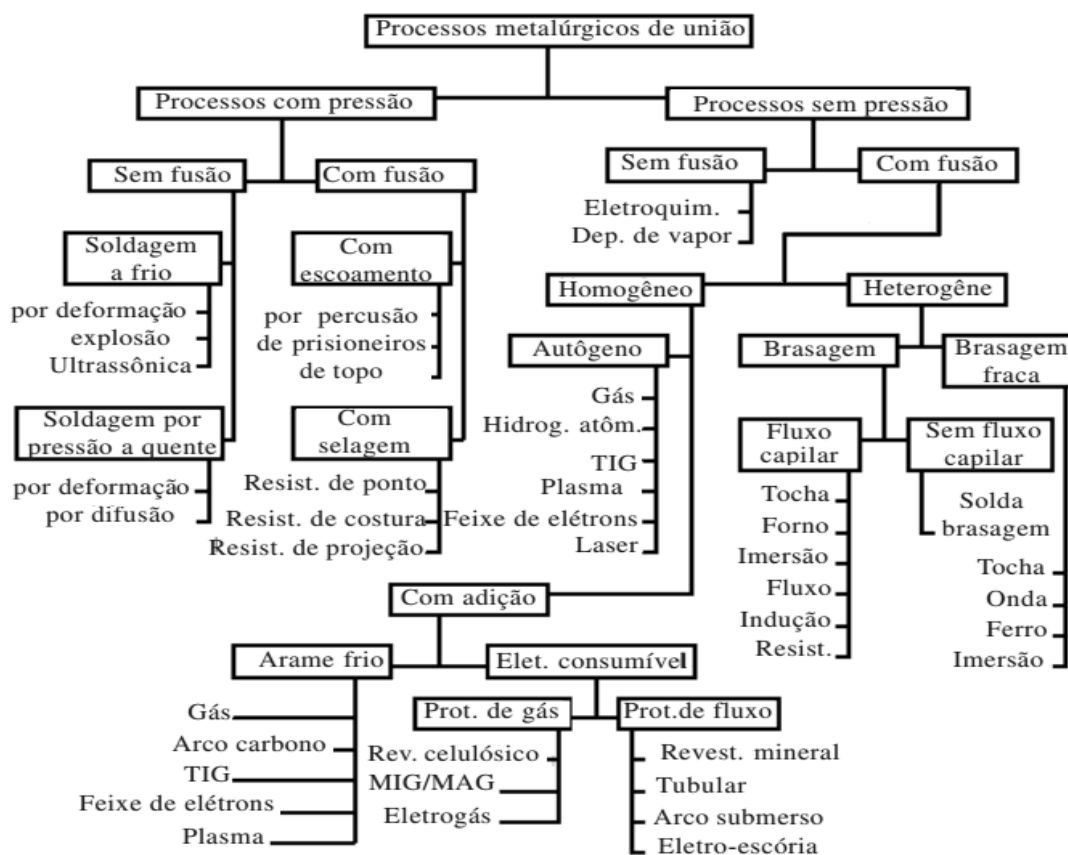
De acordo com as normas de segurança (2012), todos os cantos afiados que possam causar perigo ao condutor, equipe técnica, funcionários e agentes de segurança devem ser eliminados.

## 2.2 SOLDAGEM

A soldagem é o processo que se caracteriza pela união de duas peças, metálicas ou não, por meio intermolecular. A união destas ocorre por meio de adição de calor, com ou sem adição de pressão (WAINER, BRANDI, MELLO, 1992).

A energia térmica inserida localmente durante o processo de soldagem promove a ligação química entre as partes. Esta ligação química é similar às atuantes no interior dos próprios materiais, assegurando a continuidade de propriedades físicas e metalúrgicas na junta soldada (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).

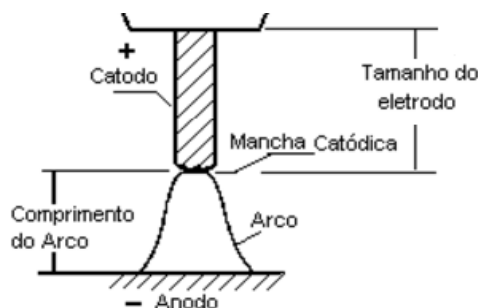
Os processos de soldagem dividem-se inicialmente em processos de soldagem por pressão e processos de soldagem por fusão, desses ramificam-se em várias outras condições ilustradas na Figura 4, sendo esses pré-selecionados para devidas situações.



**Figura 4 - Processos de Soldagem**  
**Fonte: Portal Brasileiro da Soldagem**

### 2.2.1 Soldagem a Arco Elétrico

Segundo Wainer, Brandi e Mello (1992), define-se arco elétrico como um feixe de descargas elétricas entre dois eletrodos mantidos através de um gás ionizado (gerado a partir dos eletrodos). O arco elétrico é formado com a aproximação até o contato de dois condutores de corrente elétrica e posteriormente separados. Tal fenômeno aumenta a resistência ao fluxo de corrente resultando na alta temperatura das extremidades do eletrodo. Este fenômeno gera energia térmica suficiente para a fusão local das superfícies a serem soldadas. A representação do funcionamento do arco elétrico pode ser visualizada na Figura 5.



**Figura 5 - Representação do arco elétrico**  
 Fonte: <<http://www.labsolda.ufsc.br/>>.

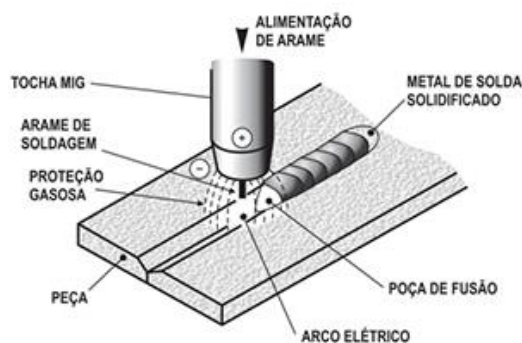
### 2.2.2 Soldagem MIG/MAG

Segundo a literatura virtual ESAB (2014), o processo de soldagem MIG/MAG foi introduzido na década de 1920 e tornado viável somente em 1948, o processo consiste de um sistema de alimentação constante de um arame consumível o qual é direcionado a uma peça metálica sob uma atmosfera de proteção gasosa, baseando-se na abertura de um arco elétrico para efetivação do processo.

O processo pode ser dividido em dois modos: o chamado de MIG (*Metal Inert Gas*) quando o gás de proteção da poça de fusão é inerte não possuindo nenhuma atividade física com a poça, ou MAG (*Metal Active Gas*) quando o gás de proteção é ativo e há interação com a poça de fusão (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

O funcionamento deste processo consiste no contato do arame com a metal base, fechando o circuito e então atingindo localmente a temperatura de fusão

resultando na “poça de fusão”, a qual ocasiona a união dos metais envolvidos, como ilustrado na Figura 6. Das características destacam-se a flexibilidade de manuseio, a qual proporciona soldagens de qualidade com grande produtividade comparada a outros processos (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

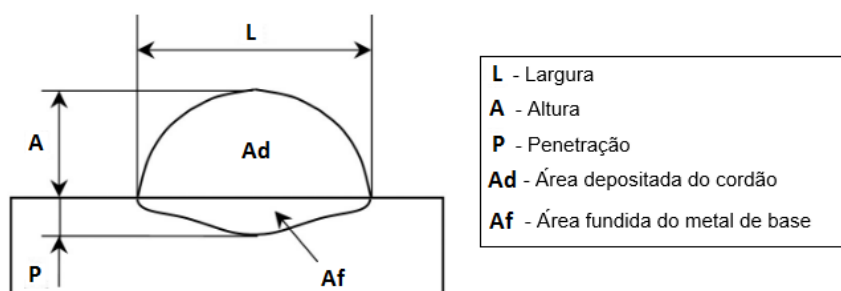


**Figura 6 - Processo de Soldagem MIG/MAG**  
 Fonte: <<http://www.infosolda.com.br/>>, adaptado.

### 2.3 CORDÃO DE SOLDA

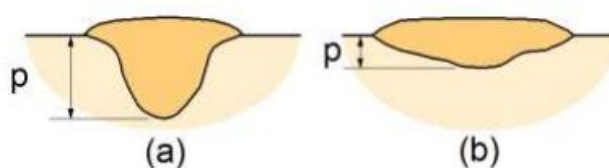
A região onde ocorreu a união das peças resultante do processo de soldagem é denominada cordão de solda. O cordão de solda é composto por metal base e metal de adição, que são misturados no estado de fusão durante o processo de soldagem (MODENESI, MARQUES e SANTOS, 2012).

Segundo Pessoa et. al. (2010), a geometria do cordão de solda visa analisar a qualidade da junta soldada, permitindo que a junta seja preenchida com mínimos defeitos. As relações geométricas do cordão de solda são ilustradas na Figura 7.



**Figura 7 - Perfil geométrico de um cordão de solda**  
 Fonte: Pessoa et al (2010), adaptado.

Os parâmetros do processo de soldagem influenciam diretamente nas geometrias de um cordão de solda. A largura e altura de um cordão de solda, por exemplo, variam conjuntamente de forma proporcional a corrente aplicada durante o processo de soldagem e inversamente proporcional à velocidade de soldagem (FORTE, 2005). Segundo Marques, Modenesi e Santos (2012), a penetração do metal de solda se dá diretamente proporcional com a corrente aplicada durante o processo de soldagem, ilustrada na Figura 8.



**Figura 8 - Efeito de alterações nos parâmetros de soldagem na geometria de cordões de solda. Condições de soldagem: (a) 800 A, 26 V e 12 mm/s e (b) 125 A, 26 V e 1,7 mm/s. Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2012), adaptado,**

Além da geometria do cordão de solda, outra característica a ser analisada é a diluição. A diluição é o nome dado à mistura de metal de base com metal de adição que ocorre durante o processo de soldagem. Esta varia de acordo com processo de soldagem e suas condições de aplicação como mostra a Tabela 1 (NOGUEIRA, 2015).

<b>Tabela 1 - Faixa de diluição de alguns processos de soldagem.</b>	
<b>Processo</b>	<b>Diluição (%)</b>
Eletrodo Revestido	25-35
TIG – autógeno	100
TIG – com adição de arame	2-20
MIG/MAG	10-30
ARAME TUBULAR	20-50
ARCO SUBMERSO ARAME	40-50
ARCO SUBMERSO FITA	15-20

**Fonte: Nogueira (2015).**

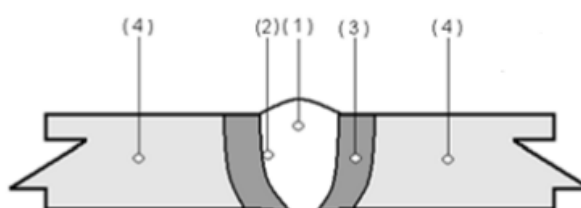
A diluição é expressa em termos de porcentagem obtida a partir da Equação

1.

$$D = \frac{A_f}{A_d + A_f} \quad (1)$$

## 2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS JUNTAS SOLDADAS

O processo de soldagem ocasiona uma alteração nas propriedades mecânicas de delimitados locais da peça soldada. Na Figura 9 é ilustrado um corte transversal de uma junta soldada de topo, nela são apresentadas a zona fundida, a zona de ligação, a zona termicamente afetada e metal de base.



**Figura 9 - Regiões de uma junta soldada: (1) zona fundida; (2) zona de ligação; (3) zona de ligação; (3) zona termicamente afetada e (4) metal base**  
 Fonte: Júnior (2013).

A zona fundida de uma junta de solda é constituída pela diluição do metal base e do metal de adição, essas podem ser formadas sob diversas condições, possuindo várias características macro e microestruturais do cordão de solda, tendo importante efeito sobre as propriedades mecânicas do material (MARQUES MODENESI, BRACARENSE, 2011). De acordo com Modenesi (2012), se tratando de processos de soldagem com eletrodo revestido, MIG/MAG e TIG, que apresentam temperatura de processo mais baixa em relação, por exemplo, aos processos de soldagem a arco submerso e eletroescória, o metal de solda apresenta uma densidade de deslocação elevada, ocasionando um aumento no limite de escoamento, caracterizando a zona fundida como mais resistente que o metal base, tal fenômeno é recorrente até mesmo após tratamentos térmicos subcríticos.

A região limite entre a poça de fusão líquida e o metal base sólido é denominada zona de ligação, dela é iniciada a solidificação e o crescimento de grãos em direção à linha central da solda (JÚNIOR, 2013).

Uma área de grande importância no processo de soldagem é a zona termicamente afetada (ZTA). Esta região merece elevada atenção visto que quando o material é submetido a esforços, esta é a área onde geralmente ocorre a fratura. A ZTA sofre alterações microestruturais devido ao ciclo térmico gerado durante a soldagem. Para o material trabalhado a frio, na ZTA pode haver recristalização dos



grãos, e com isso a diminuição da sua resistência, dureza e tenacidade; além do que, com o resfriamento, podem se formar tensões residuais nessa região, a qual enfraquece a junta (CALLISTER, 2007).

## 2.5 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos são fundamentais para a determinação das propriedades mecânicas do material que está sendo ou será submetido a esforços. Dos ensaios mecânicos podem se obter informações do material como: resistência, elasticidade, plasticidade, resiliência e tenacidade (GARCIA, SPIM, DOS SANTOS, 2012).

Os ensaios mecânicos são classificados em destrutivos e não destrutivos, e ainda na forma em que são aplicadas as cargas, como: estáticos, dinâmicos e carga constante. Os métodos de ensaios aplicados podem ser de ensaios realizados na própria peça, em modelos, amostras e/ou em corpos de prova retirados de parte da estrutura. Visto que o ensaio destrutivo causa danos à peça inicial, a mesma se torna inutilizável, com isso o ensaio é geralmente realizado a partir de corpos de prova, modelos e amostras (GARCIA, SPIM, DOS SANTOS, 2012).

### 2.5.1 Ensaio Destrutivo: Ensaio de Tração

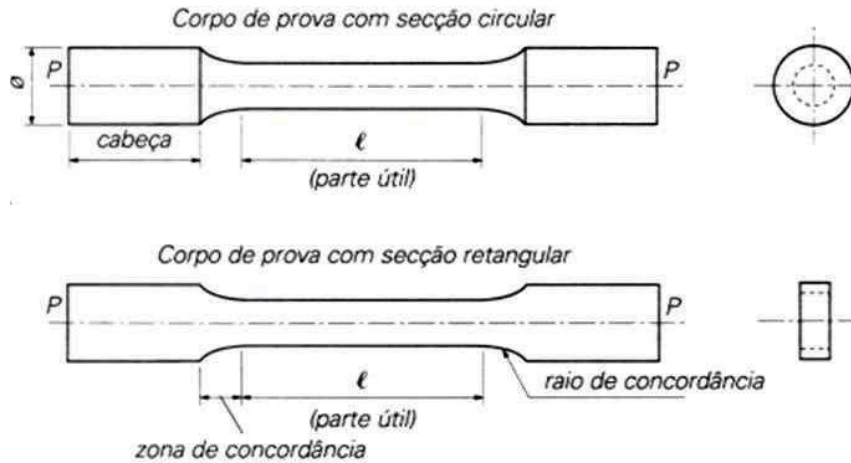
O ensaio de tração consiste na aplicação de esforços concorrentes, crescentes em um corpo de prova até o seu rompimento. A Figura 10 ilustra corpos de prova usualmente utilizados para ensaios mecânicos de tração (GARCIA, SPIM, DOS SANTOS, 2012).

Para análise gráfica, deve-se obter a tensão ( $\sigma$ ) e a deformação ( $\epsilon$ ), as quais são obtidas pela Equação 2 e Equação 3 respectivamente.

$$\sigma = \frac{P}{S_o} \quad (2)$$

Onde a carga e a secção transversal são dadas por  $P$  e  $S_o$ , respectivamente.

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$



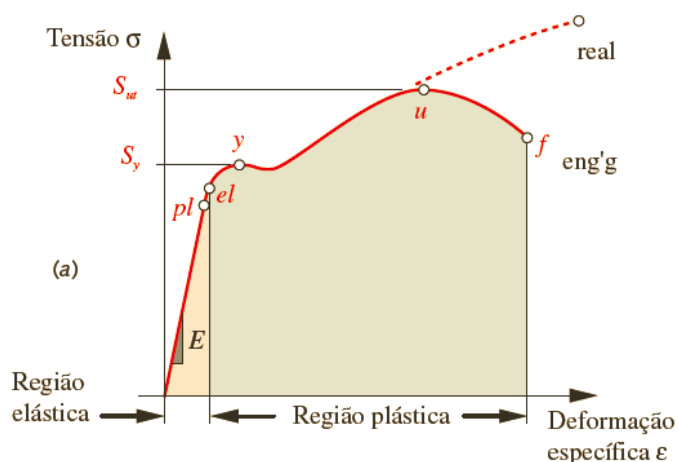
**Figura 10 - Corpo de prova usualmente utilizados para ensaios de tração**  
**Fonte: <<http://infosolda.com.br/>>, adaptado.**

A deformação é dada pela razão da diferença de comprimento final e inicial sobre o comprimento inicial.

O módulo de elasticidade é obtido a partir da razão da tensão sobre deformação, conforme a Equação 4, a partir da equação é obtido o gráfico tensão-deformação para a análise das propriedades mecânicas. Pela Figura 11 observa-se a análise gráfica genérica do gráfico tensão-deformação (GARCIA, SPIM, DOS SANTOS, 2012).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

Neste ensaio podem-se obter diversas propriedades mecânicas como: limite de resistência à tração, limite de escoamento, módulo de elasticidade, módulo de resiliência, módulo de tenacidade, coeficiente de encruamento, coeficiente de resistência e parâmetros relativos à ductilidade (GARCIA, SPIM e DOS SANTOS, 2012).

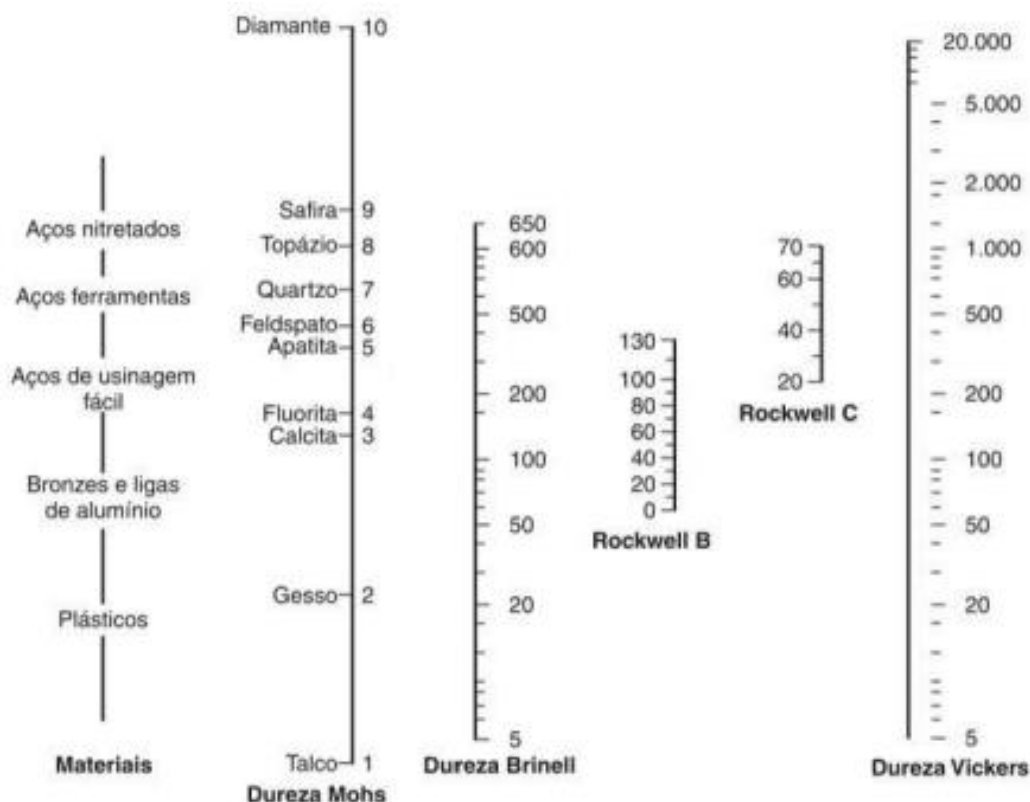


**Figura 11 - Gráfico Tensão x Deformação**  
**Fonte: Norton, 2013.**

### 2.5.2 Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza tem por finalidade mensurar a resistência de um material sólido de se deformar, através da aplicação de uma carga pontual. Existem dois principais métodos para determinação da dureza, por risco ou penetração os quais possuem suas escalas respectivas. Enquanto a escala mais conhecida por risco (Dureza Mohs) é classificada qualitativamente em uma escala de 10 minerais padrões organizados por níveis de dureza, o ensaio de dureza por penetração possui diversas escalas, sendo Brinell, Rockwell e Vickers as principais, estas são utilizadas para ensaiar diferentes materiais, podendo analisar as variações das escalas a partir da Figura 12, dessas quando sobrepostas podem ser convertidas entre elas por meio de comparação entre as tabelas dessas escalas (CALLISTER, 2007).

Dentre os métodos, o mais comumente utilizado é o ensaio de dureza Rockwell devido a sua simplicidade de execução. A combinação das variações das cargas e do diâmetro da esfera de aço endurecido ( $1/16''$ ,  $1/8''$ ,  $1/4''$ ,  $1/2''$ ) e cônico de diamante permitem uma grande ou total abrangência em ensaiar materiais (GARCIA, SPIM E SANTOS, 2012).



**Figura 12 - Escalas comparativas entre os valores de vários métodos de durezas.**  
**Fonte: Garcia, Spim e Santos (2012), adaptado.**

Para este método, o índice de dureza é determinado a partir da diferença na profundidade, resultando uma carga inicial seguida da carga principal, superior a inicial. Baseando nas magnitudes dessas cargas, surgem dois tipos de ensaio Rockwell, sendo estes o Rockwell normal e o Rockwell superficial. A carga inicial aplicada no ensaio Rockwell é de 10 kgf, e as cargas principais são de 60, 100 e 150 kgf, sendo cada uma dessas representadas por uma letra do alfabeto. Enquanto a carga inicial do ensaio Rockwell superficial é de 3 kgf, e as principais são de 15, 30, 45 quilogramas, identificadas pelas letras N, T, W, X ou Y, dependendo do penetrador (CALLISTER, 2007).

Para cada escala Rockwell, a dureza pode variar até 130, no entanto valores acima de 100 e abaixo de 20 tornam-se imprecisos, e é aconselhado utilizar outra escala sobreposta. Efetuar o ensaio próximo à aresta, ensaios em superfícies curvas, ensaio empilhados uns sobre os outros e ensaios em corpos de prova com espessura inferior a 10 vezes de profundidade do ensaio tornam o ensaio impreciso (CALLISTER, 2007).

Segundo Callister (2007), no ensaio de dureza Brinell é utilizado um penetrador de esfera de aço endurecido ou carbeto de tungstênio com diâmetro de 10 milímetros. Neste ensaio as cargas variam entre 500 a 3000 kgf e estas são mantidas durante um tempo pré-determinado.

O ensaio de dureza Brinell é mensurado a partir da magnitude da carga e do diâmetro da impressão resultante, sendo medido através de um microscópio de baixa potência utilizando uma escala gravada em seu ocular. O diâmetro mensurado é convertido ao número HB (dureza Brinell) apropriado com auxílio de um gráfico (CALLISTER, 2007).

No ensaio de dureza Vickers se utiliza um penetrador de diamante com geometria piramidal. Estes são aplicados com cargas muito inferiores se comparados aos outros métodos, variando entre 0,001 a 1 kgf. A medição é obtida através da impressão obtida no corpo de prova, esta é convertida em um índice de dureza Vickers (GARCIA, SPIM E SANTOS, 2012).

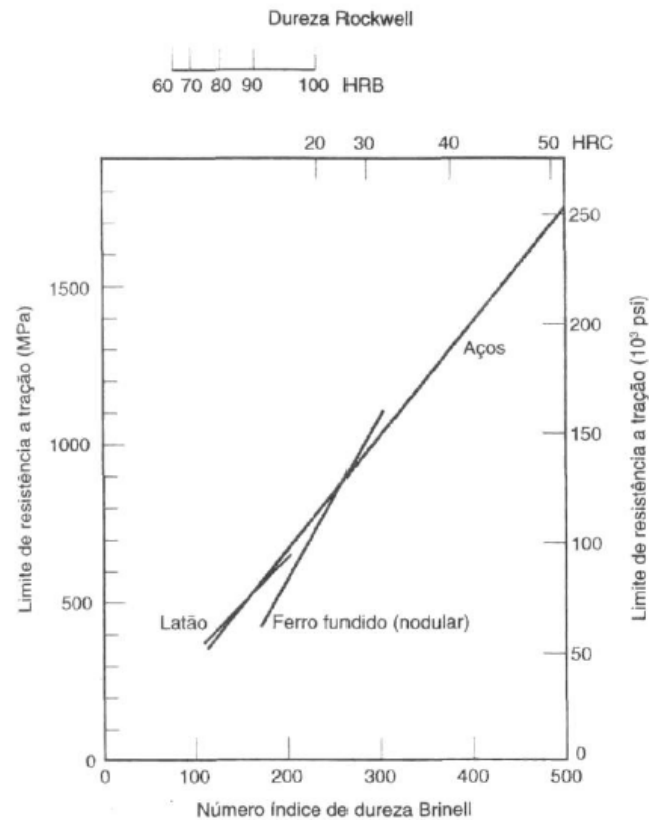
Para melhor precisão deste ensaio aconselha-se uma preparação antecipada do corpo de prova, realizando-se um lixamento e polimento da superfície, assegurando assim a impressão bem definida à ser medida. Este método é mais utilizado para medir durezas em regiões pequenas e selecionadas do corpo de prova (GARCIA, SPIM E SANTOS, 2012).

A conversão de uma escala de dureza para outra é conveniente, no entanto a dureza não é uma propriedade bem definida dos materiais visto que existem vários métodos de medidas. Os dados existentes atualmente foram obtidos experimentalmente, e desses observou que os dados de conversão mais confiáveis são os dados para o aço (CALLISTER, 2007).

De acordo com Callister (2007), a partir do ensaio de dureza Brinell estima-se um valor aproximado do limite de resistência à tração devido a sua proporcionalidade, conforme ilustra a Figura 13.

De acordo com a Figura 13 a proporcionalidade para o aço, latão e ferro fundido são diferentes, mas admite-se como regra geral para a maioria dos aços a seguinte relação expressa na Equação 5. Onde *LRT* e *HB* representam o Limite de Resistência a Tração e Dureza medida em Brinell (CALLISTER,2007).

$$LRT = 3,45 \times HB \quad (5)$$



**Figura 13 - Gráfico Limite de Resistência à Tração x Dureza Brinell**  
**Fonte: Callister (2007), adaptado.**

### 2.5.3 Ensaio Metalográficos

A metalografia é o estudo e a descrição da morfologia e estrutura dos metais e ligas. Esta ferramenta nos possibilita encontrar diversas relações, dentre essas se destacam as relações das propriedades físicas dos metais com o seu desempenho nas funções mecânicas (COLPAERT, 2008).

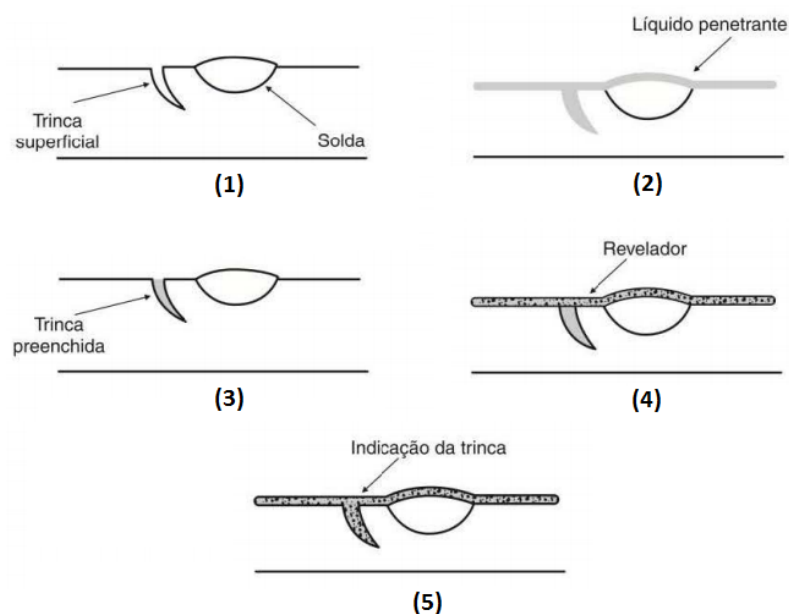
Seu meio de observação do ensaio pode ser subdividido em duas classes: Macroscopia e Microscopia. Enquanto a observação macroscópica é feita a olho nu, com lupa ou microscópios estéreo, com aumentos que podem alcançar até 50 vezes, a observação microscópica é feita em um microscópio com aumentos que podem alcançar até 2500 vezes (COLPAERT, 2008)

Para que ocorra o processo de observação de superfícies e o mesmo seja eficiente, deve-se haver um processo preparatório da amostra, visando deixá-las em condições de análise.

A preparação da amostra consiste nas etapas de corte, seguidas por embutimento metalográfico, lixamento, polimento e finalizando com ataque químico. Com a garantia de execução desses processos corretamente, a amostra contemplará menor rugosidade possível sem vestígios de lixamento e grãos sem irregularidades, e com a ação do ataque químico irá contemplar também a microestrutura revelada (COLPAERT, 2008).

#### 2.5.4 Ensaio Não Destrutivo: Ensaio por Líquidos Penetrantes

O ensaio por líquido penetrante constitui-se na penetração de um líquido específico em pequenas trincas e rachaduras nas superfícies, as quais não são observáveis a olho nu. Este método é aplicável principalmente em materiais não magnéticos, como aços inoxidáveis, plásticos e cerâmicos por exemplo. Para sua boa eficiência é importante a limpeza antes do ensaio e seguir as instruções do produto, que consiste em aplicar o líquido penetrante, retirar o excesso e então aplicar o pó revelador para assim haver a inspeção visual, conforme ilustrado na Figura 14 (GARCIA, SPIM, DOS SANTOS, 2012).



**Figura 14 - Sequência do ensaio com líquidos penetrantes**  
Fonte: Garcia, Spim e Santos (2012), adaptado.

### 2.5.5 Ensaio Não Destrutivo: Inspeção Visual

Segundo Garcia, Spim e Dos Santos (2012), a inspeção visual é o método mais antigo aplicado para verificação de imperfeições. Como o método consiste na inspeção a olho nu, se for detectada alguma falha a mesma é imediatamente condenada. Para este processo é de extrema importância a experiência do operador para identificação das imperfeições.

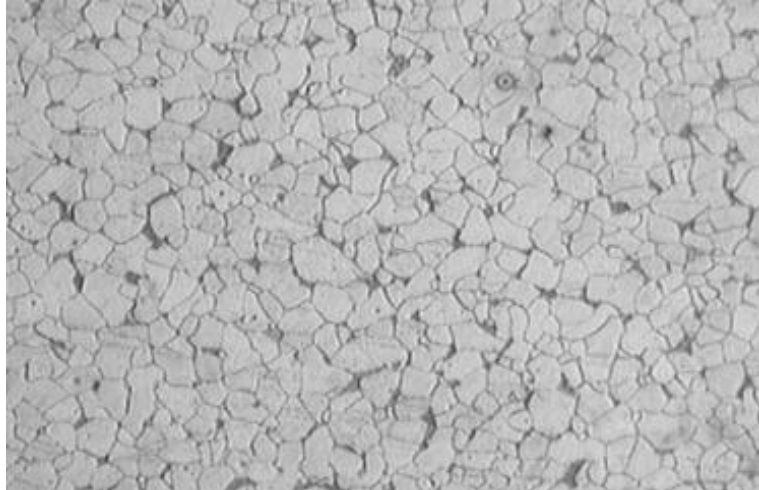
## 2.6 CARACTERIZAÇÃO DO AÇO SAE 1020

O aço carbono se caracteriza por ser uma liga metálica, a qual é formada principalmente por ferro e carbono. De mesma composição química que o ferro fundido, o aço difere-se pela sua quantidade inferior a 2,11% de C em sua composição, a principal consequência disto é evidente na alta ductibilidade do aço enquanto o ferro fundido se caracteriza pela sua fragilidade (CHIAVERINI, 1986).

O aço é classificado de acordo com sua composição química, dentre os sistemas o mais utilizado é o sistema de classificação química SAE (Society of Automotive Engineers – EUA). O padrão utilizado é o ABXX, no qual AB refere-se a elementos de liga adicionados, e XX se refere à parte do percentual em peso de carbono multiplicado por cem (CHIAVERINI, 2005).

Para o SAE 1020, a proporção de Carbono é de aproximadamente 0,2%, dando características às seguintes propriedades mecânicas: limite de resistência a tração 394 MPa; Limite de escoamento 295 MPa; Alongamento 36,5% (perlita grossa) e Limite de Escoamento 346 MPa; Limite de resistência a Tração 441 MPa e alongamento 36% (perlita fina). É composto quimicamente de 0,18%-0,23%C, 0,3-0,6%Mn. Na Figura 15 é ilustrado a fotomicrografia do aço SAE 1020, obtida pelo Laboratório de metalografia IFAM em 2010 para seu estudo (CALLISTER, 2007).



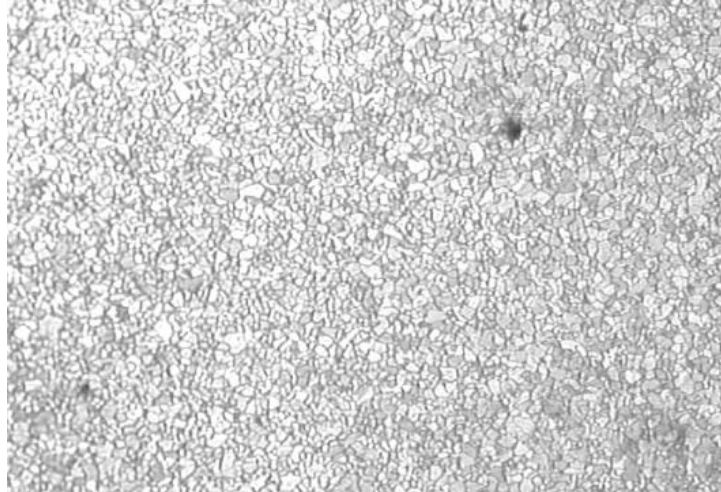


**Figura 15 - Micrografia do aço SAE 1020 – ataque Nital a 2% - 160 X  
Fonte: Rodrigues (2014).**

### 2.6.1 Caracterização do Aço SAE 1020 - Pós Soldagem

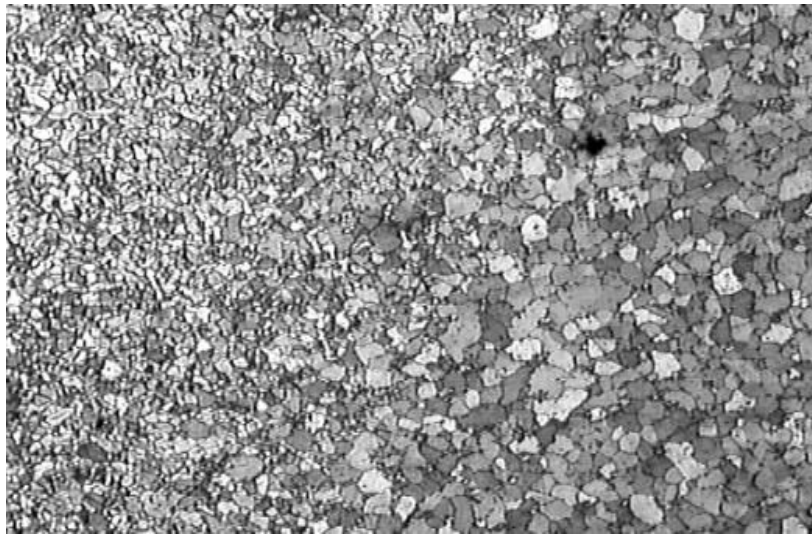
Após o processo de soldagem a arco elétrico, devido a um superaquecimento concentrado seguido de resfriamento, há uma região onde envolve a perda de propriedades mecânicas, tal região é chamada de ZTA (Zona Termicamente Afetada). A ação de examinar a ZTA é de grande importância para análise de propagação de trincas e mecânica da fratura (RODRIGUES, 2014).

Rodrigues (2014) registrou a fotomicrografia do SAE 1020, representada pela Figura 16, caracterizada pela homogeneidade dos grãos de perlita e ferrita, natural de um aço recozido ou normalizado não revelando alteração microestrutural alguma.



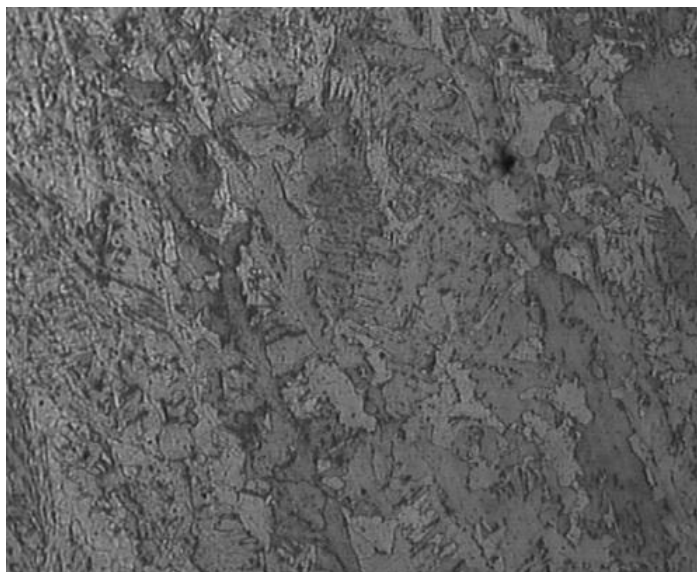
**Figura 16 - SAE 1020 - Região mais distante da ZTA (estrutura: grãos pardos Perlita + grãos claros Ferrita, ataque Nital 2%, 160 X)**  
Fonte: Rodrigues (2014).

Para outra fotomicrografia localizada mais próxima da ZTA, tem-se a diferença nítida podendo ser observada pelo crescimento de grãos analisado na Figura 17.



**Figura 17 - SAE 1020 - Região na interface da ZTA (estrutura: grãos pardos Perlita + grãos claros Ferrita, ataque Nital 2% 160 X)**  
Fonte: Rodrigues (2014).

Na Figura 18 pode ser observada a região da zona de fusão do metal depositado por arco elétrico com eletrodo revestido E6013.



**Figura 18 - SAE 1020 - Região da zona de fusão do metal depositado por arco elétrico (estrutura de ferrita alotriomórfica nos contornos de grãos, ferrita acicular e perlita fina - ataque Nital 2% 160 X)  
Fonte: Rodrigues (2014).**

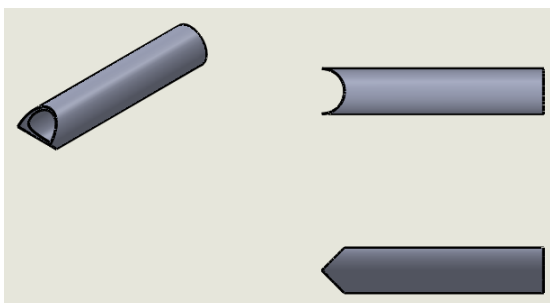
### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 DELIMITAÇÃO DOS MATERIAIS A SEREM UTILIZADOS

De acordo com o Regulamento Baja SAE Brasil (2012), há a necessidade de se comprovar por meio de cálculos, se o material a ser utilizado possui equivalência ou margem aceitável para a utilização de aços diferentes ao Aço SAE 1018. Para a fabricação do veículo Baja, foi utilizado barras de Aço SAE 1020 trefilado com diâmetros de uma polegada.

Os tubos foram devidamente cortados com a ferramenta “serra copo” dando o formato “boca de lobo”, demonstrado na Figura 19. Esses cortes foram angularmente cortados em  $60^\circ$  e  $90^\circ$  de defasagem em relação ao eixo paralelo ao tubo.

Para a união em  $180^\circ$  não houve a necessidade de um corte mais elaborado, foi utilizada a serra para um corte linear, podendo assim realizar a união pelas extremidades dos tubos.



**Figura 19 - Corte tipo "boca de lobo" realizada em  $90^\circ$  - Vistas: isométrica, inferior e frontal**  
Fonte: Autoria própria.

Foram fabricados três corpos de prova, um para cada angulação já descrita. Essas angulações foram escolhidas devido a maior presença no projeto da estrutura da gaiola.

#### 3.2 PROCESSO DE SOLDAGEM

Com os cortes realizados para os diferentes tipos de situações, pôde-se iniciar a união dos tubos através do processo de soldagem MAG, no laboratório da

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Guarapuava. Para o processo de soldagem foi utilizada a máquina de solda modelo Hank 335 da marca SUMIG. A mistura dos gases de proteção se deu por 75% Argônio e 25% de Oxigênio e o arame utilizado foi AWS A5.18 ER70S-6, composto por C (0,07-0,15 %); Mn (1,40-1,80 %); Si (0,80-1,15 %); S ( $\leq 0,035$  %) e P ( $\leq 0,025$  %) segundo a literatura ESAB.

Para o processo de soldagem foi utilizado os seguintes parâmetros contidos na Tabela 2.

**Tabela 2 - Parâmetros utilizados**

Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Velocidade de alimentação do arame de solda (mm/sec)	Vazão do gás de proteção (L/min)
155-160	18-20	23-28	114-118	20

Fonte: <<http://esab.com.br/>>, adaptado.

### 3.3 PROCESSOS DE INSPEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Com o processo de soldagem devidamente realizado, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios mecânicos não destrutivos (inspeção visual e líquidos penetrantes) seguidos pelo ensaio de dureza e metalografia.

Após o ensaio de dureza realizado nos três modelos de corpos de prova (180°, 90° e 60°), o corpo de prova soldado linearmente (180°) seguiu para retirada de amostras para a análise metalográfica.

#### 3.3.1 Inspeção visual

A análise iniciou-se com o processo de inspeção visual, para caso houvessem defeitos nítidos o corpo de prova imediatamente descartado não havendo necessidade de dar continuidade aos processos de inspeção seguintes.

### 3.3.2 Ensaio por Líquidos Penetrantes

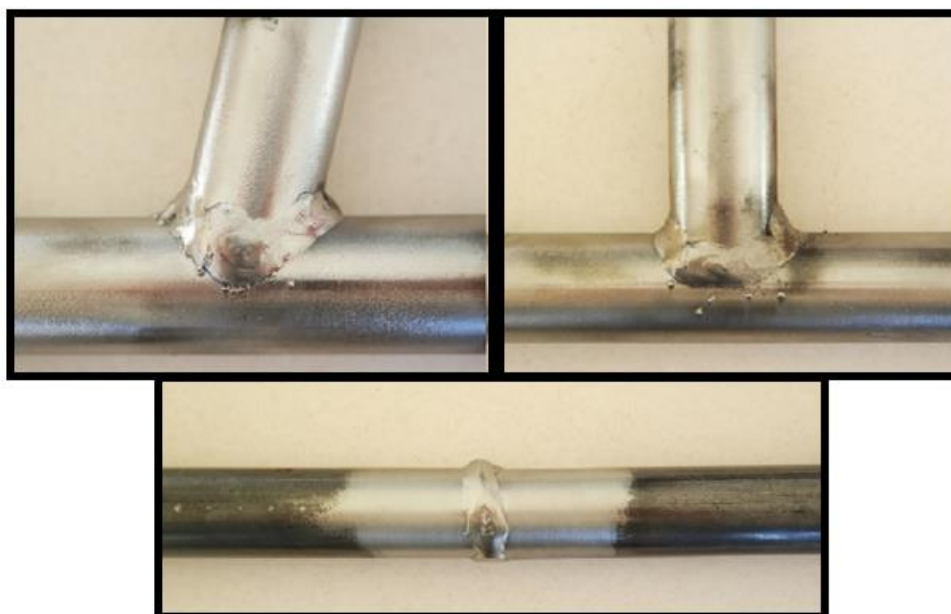
O ensaio por líquidos penetrantes foi realizado de acordo com os passos sugeridos pelo produto utilizado.

Iniciou-se com a limpeza do corpo de prova, com água e sabão, seguido pela secagem da área. Após a secagem o líquido penetrante foi aplicado na área do cordão de solda, aguardou-se o tempo de 10 minutos para a penetração do líquido nas possíveis falhas.

Com a ação completa do líquido penetrante, a área foi limpa com água corrente para a retirada de excessos. Com a peça devidamente seca, foi aplicado o revelador para verificação das possíveis falhas.

### 3.3.3 Ensaio de Dureza

Para o ensaio de dureza foram feitas demarcações com intervalos de 2 milímetros, essas demarcações percorreram a marcação de aproximadamente -6 à 6 (*range* da demarcação), varrendo em torno de 2,5 centímetros aproximadamente. A Figura 20 ilustra o corpo de prova contendo a junta soldada, ZTA e material base.



**Figura 20 - Corpos de prova utilizados no ensaio da dureza**  
Fonte: Autoria própria.

Nos corpos de prova que possuíam angulação na união este método utilizado para medir os pontos de dureza não foi efetivo, devido à dificuldade de

fixação na máquina de dureza e por não haver mais área para realizar a medição, nestes casos foram realizados menos pontos de mensuração.

Para o ensaio de dureza foi utilizado um Durômetro de Bancada Digimess Rockwell B Normal, utilizando o edentador esférico de 1/16" (polegadas) com carga inicial de 10 kgf e Carga Principal de 100 kgf.

#### 3.3.4 Ensaio Metalográfico

Para a realização do ensaio metalográfico houve a preparação das amostras retiradas do corpo de prova, deste foi retirada amostra do cordão de solda e do metal base para fins de efeito comparativo. Para este processo, foram realizados o corte do corpo de prova com a cortadora Metalográfica CM40/60, o qual possibilitou cortes sem alterações microestruturais do material e alcançou dimensões que possibilitaram o embutimento.

O embutimento das amostras realizou-se através da Prensa Embutidora Metalográfica Manual EM30D ( $\varnothing$  30 mm), onde as amostras foram embutidas à quente utilizando como material de resina a baquelite. No processo de embutimento a amostra permaneceu com pressão aproximada de 150 kgf/mm<sup>2</sup> até atingir a temperatura de 160°C, permaneceu nesta pressão até o resfriamento atingindo a temperatura de 60°C, perdurando 20 minutos aproximadamente processo de embutimento.

Com a conclusão do processo de embutimento foi realizado o lixamento das amostras visando eliminar marcas mais profundas contidas na superfície. Esse processo consistiu-se em utilizar lixas de granulometria sucessivamente menor, e para cada lixa subsequente a amostra foi rotacionada em 90° para que cada processo de lixamento eliminasse as marcas deixadas pela lixa anterior até que essas fossem extintas.

Para o processo de lixamento foi utilizado o equipamento Politriz Lixadeira Metalográfica PL02, e a sequência de lixas de carbeto de silício utilizadas neste método aplicado foi 220, 360, 400, 600, 1200 mesh, com rotação de 400 RPM. As amostras foram mantidas na lixadeira com intervalos para análise, até que os riscos deixados pela lixa anterior fossem eliminados.

Após a finalização do processo de lixamento, as amostras foram devidamente limpas com água, seguido de limpeza com álcool etílico, no intuito de eliminar poeiras e traços abrasivos de sua superfície.

Com a limpeza devidamente realizada, prosseguiu-se com o polimento com alumina (0,5 microns) da superfície da amostra, sendo realizado através da Politriz Lixadeira Metalográfica – PL02E.

Na próxima etapa realizou-se o ataque químico na superfície da amostra, com o reagente Nital a 3% (97 ml álcool etílico 3 ml de ácido nítrico concentrado) por aproximadamente 10 segundos, seguido pela limpeza com água e álcool etílico, e secagem com ar quente.

Com todo processo de preparação da amostra concluído, as amostras foram encaminhadas ao microscópio óptico da marca Olympus e modelo BX521 para a análise micrográfica, usando lentes de ampliação de 5x e 20x.

### 3.3.5 Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado somente no corpo de prova unido linearmente. Não foi possível a realização de ensaios mecânicos destrutivos nos demais corpos de prova devido às suas angulações, esta condição impossibilitou a fixação dos corpos de prova na Máquina Universal de Ensaios Mecânicos.

Para prevenção da deterioração do corpo de prova aos esforços exercidos na sua fixação e isto não causar um ensaio com resultados incertos, foi devidamente usinado dois tarugos de aço inox de aproximadamente 19 milímetros de diâmetro e aproximadamente 200 milímetros de comprimento, este foi inserido no interior das extremidades dos tubos, região que estará em contato com as garras.

Para o ensaio de Tração foi utilizada a Máquina Universal de Ensaios Mecânicos modelo EMIC DL 30000 do laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Guarapuava.

## 3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Com o término dos ensaios, os resultados obtidos foram registrados e analisados, no intuito de encontrar as alterações significativas das propriedades



mecânicas influenciadas pelo processo de soldagem e se essas são ainda permissíveis e seguras para suportar as sucessivas ações mecânicas que serão submetidas na competição sem que haja falhas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Antes de iniciar todo o processo de análise das propriedades mecânicas decorrentes do processo de soldagem nos corpos de prova de Aço SAE 1020, foi necessário a validação deste conforme exige a norma vigente da competição Baja SAE Brasil. Segundo a norma de segurança do projeto Baja SAE (2012), revisado em dezembro de 2016, é exigido a utilização de aços com teor de carbono de pelo menos 0,18%, com diâmetros externo de tubo de 25,4 milímetros com espessura de parede de 3,05 milímetros. Para fabricação utilizando materiais diferentes deste, a norma exige cálculos comprovando valores proporcionais de resistência e rigidez à flexão aos do aço 1018 ( $S_y = 370$  MPa e  $E = 205$  GPa).

Para possibilitar o início dos cálculos obteve-se valores tabelados do limite de escoamento do Aço SAE 1020 trefilado retirados do catálogo da Arcelor Mittal conforme ilustra a Tabela 3.

**Tabela 3 - Propriedades Mecânicas Estimadas de barras de Aço Trefiladas.**

SAE	Processamento	Limite de Escoamento ( $S_y$ ) (MPa)	E (Deformação) ( $2^*$ )%	Dureza Brinell (HB)	Limite de Resistência à Tração ( $LRT$ )
1018	Trefilado	370	15	126	435
1020	Trefilado	350	15	121	417,5

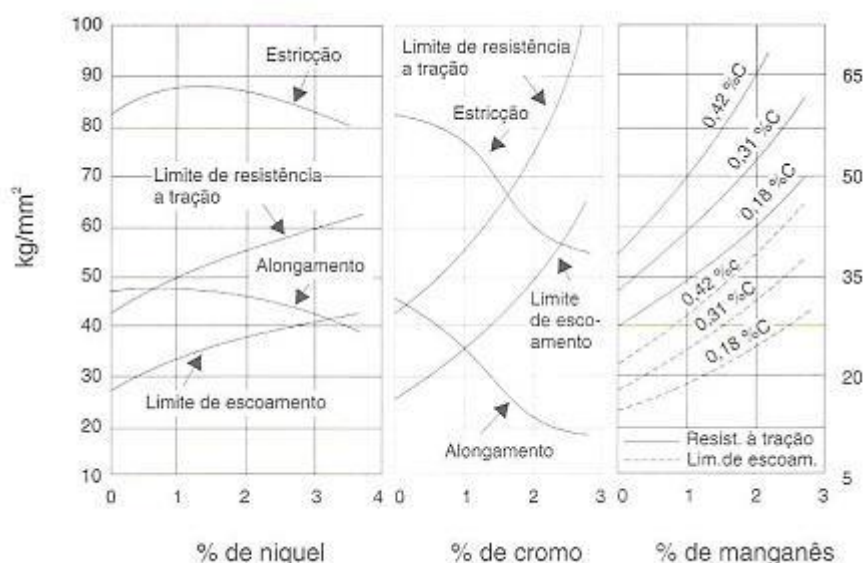
Fonte: <brasil.arcelormittal.com.br>, adaptado.

O fato do aço SAE 1018 ser mais resistente que o aço SAE 1020 mesmo com a porcentagem de Carbono (C) inferior na sua composição se dá pela presença em maior porcentagem de Manganês, ilustrado na Tabela 4. A maior proporção do Manganês na composição do aço ocasiona um aumento proporcional da resistência à tração assim como Níquel e Cromo, como demonstra a Figura 21 (CHIAVERINI, 2005).

**Tabela 4 - Composição química do Aço Carbono.**

SAE	Carbono %C	Manganês %Mn	Fósforo %P (máx.)	Enxofre %S (máx.)
1018	0,15 – 0,20	0,60 – 0,90	0,40	0,50
1020	0,18 – 0,23	0,30 – 0,60	0,40	0,50

Fonte: <brasil.arcelormittal.com.br>, adaptado.



**Figura 21 - Efeito do níquel, cromo e manganês sobre as propriedades mecânicas do aço de baixo e médio carbono**  
**Fonte: Chiaverini (2005).**

Segundo Garcia, Spim e Dos Santos (2012), o módulo de elasticidade é obtido a partir da Equação 4, onde o limite de escoamento e a deformação são dividendo e divisor, respectivamente. Analisando os valores de deformação observa-se que são equivalentes, logo basta calcular o limite de escoamento para a validação.

Para a validação dos tubos utilizados, partiu-se da equação de momento fletor que supostamente deve ser suportado de modo equivalente ou superior pelo aço utilizado em comparação ao exigido pela norma. O momento fletor ( $M_f$ ) representa a soma algébrica dos momentos aplicados transversalmente ao eixo longitudinal, produzindo esforços que tendem a curvar o eixo longitudinal, este é encontrado a partir da Equação 6, onde  $S_y$  simboliza o Limite de Escoamento (MPa),  $I_x$  o momento de área em relação ao eixo x e  $c$  é a distância do eixo à parte mais externa do tubo, onde sofre maiores tensões (NORTON, 2013).

$$M_f = \frac{S_y I_x}{c} \quad (6)$$

O momento de área em relação ao eixo x é encontrado de diversas maneiras, no caso de tubos vazados são encontrados a partir da Equação 7, onde o diâmetro externo é representado por  $D$  e o diâmetro interno por  $d$  (NORTON, 2013).

$$I_x = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) \quad (7)$$

Partindo das equações e dos dados tabelados obtidos através da Arcelor Mittal, basta apenas escolher a metodologia a ser implementada para a realização dos cálculos. Neste trabalho foi encontrada a espessura mínima para que o Aço SAE 1020 trefilado utilizado no projeto seja válido. Para encontrar a espessura mínima encontra-se primeiramente o diâmetro interno, visto que foi utilizado um tubo de 25,4 milímetros. A Equação 8 representa a adaptação das equações para a obtenção do diâmetro interno máximo do Aço 1020 utilizado a ser obtido para então encontrarmos a espessura mínima da parede do tubo.

$$d_{m\acute{a}x} \leq (D^4 - \frac{64}{\pi} \times \frac{1}{(S_y)_{1020}} \times (S_y \times I_x)_{1018} \times \frac{c_{1020}}{c_{1018}})^{1/4} \quad (8)$$

Os resultados de  $d_{m\acute{a}x}$  e espessura encontrados para a aceitação da utilização de tubos deste material proposto na confecção da estrutura do Baja SAE estão ilustrados na Tabela 5.

**Tabela 5 - Propriedades Mecânicas Estimadas de barras de Aço Trefiladas com dados de diâmetro e espessura validados a partir de cálculos.**

SAE	Processamento	Limite de Escoamento (MPa)	$\epsilon$ (Deformação) (2*)%	$d$ (mm)	Espessura da parede do tubo (mm)
1018	Trefilado	370	15	19,3	3,05
1020	Trefilado	350	15	18,74	3,33

Fonte: <brasil.arcelormittal.com.br>, adaptado.

A análise feita é fundamental para a validação do material utilizado na fabricação da estrutura, e possibilita a ingressão na competição Baja SAE conforme dita a norma de segurança exigida.

#### 4.1 ANÁLISE GEOMÉTRICA DO CORDÃO DE SOLDA

A análise das propriedades mecânicas dos tubos resultantes da união pelo processo de soldagem MAG foi feita a partir da metalografia, ensaios não destrutivos (inspeção visual e Líquidos penetrantes) e ensaios de dureza, esse que serviu de base teórica para sustentação dos cálculos para o ensaio de tração.

Partindo dos tubos de Aço SAE 1020 trefilados utilizados na confecção da estrutura, foram confeccionados três corpos de prova unidos pelo processo de soldagem com angulações distintas, ilustrado na Figura 20.

Para a análise do cordão de solda, foi retirada uma amostra do corpo de prova onde está presente o cordão de solda e sua geometria, ilustrado na Figura 22



**Figura 22 - Amostra do cordão de solda embutido em baquelite**  
**Fonte: Autoria própria.**

Da amostra analisada microscopicamente obteve-se valores quantitativos de largura, altura e penetração. A partir destes pode-se encontrar os valores de área fundida do metal de base e área depositada do cordão e a diluição presente nesta parte da amostra, esses são demonstrados na Tabela 6.

**Tabela 6 - Morfologia dos cordões de solda**

Amostra	l (mm)	h (mm)	P (mm)	Ad (mm <sup>2</sup> )	Af (mm <sup>2</sup> )	D (%)
180°	8,5	0,6	3,3	5,0	8,8	63,79

**Fonte: Autoria própria**

A partir da Figura 22 comprova o alto valor resultante da diluição encontrado por meio de cálculos, visto que a área de reforço é bem pequena e a penetração da solda atingiu toda a espessura comprovando uma qualidade boa na união soldada.

## 4.2 ENSAIOS MECÂNICOS

### 4.2.1 Ensaio por Líquidos Penetrantes

Com os ensaios por líquidos penetrantes foi possível verificar a presença de respingos, poros e mordeduras nos diferentes corpos de prova.

Enquanto na união linear dos tubos observou a presença de pouca porosidade e nenhuma mordedura evidenciada, os corpos unidos com angulações apresentaram mordeduras, respingos e porosidades, principalmente nos tubos unidos em 90°, ilustrados na Figura 23. Nesses ocorreram maiores imperfeições pela dificuldade da aplicação do processo de soldagem, por exigir maior área de preenchimentos e por eventuais tolerâncias mal dimensionadas no corte “boca de lobo”.

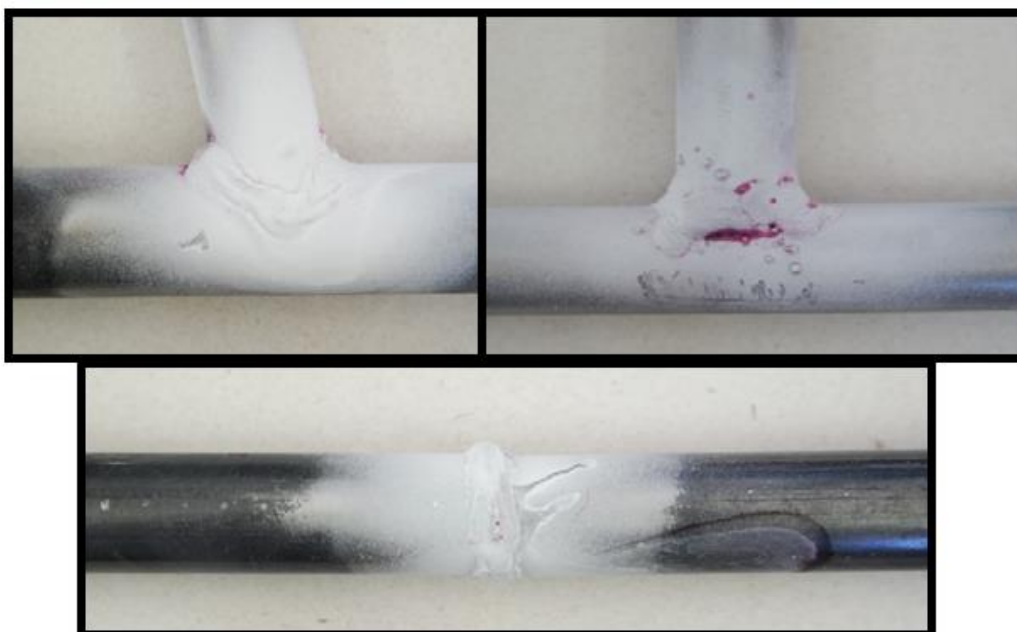
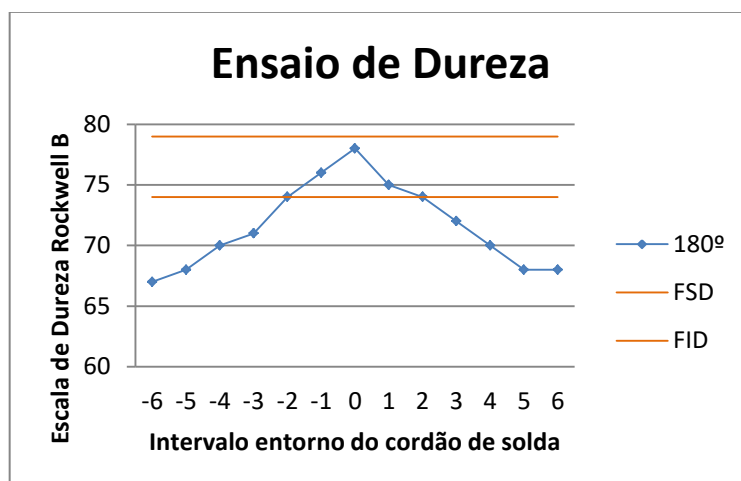


Figura 23 - Análise com líquidos penetrantes após aplicação do revelador  
Fonte: Autoria própria.

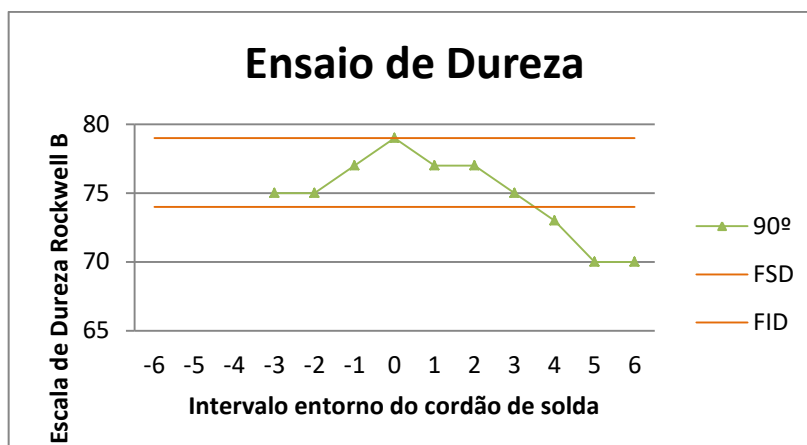
#### 4.2.2 Ensaio de Dureza

Os valores obtidos a partir do ensaio de dureza Rockwell foram inseridos no Gráfico 1 contrastando com a faixa de dureza comum do aço SAE 1020 encontrado nas literaturas da Arcelor Mittal.

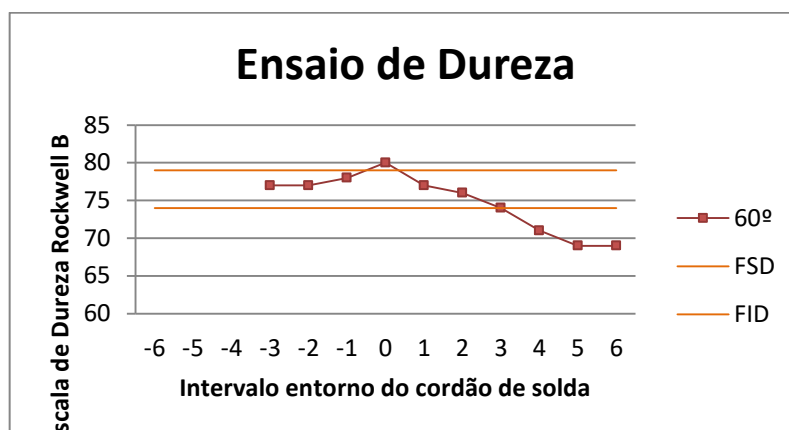
A faixa de dureza comum do aço SAE 1020 foi encontrada em forma de dureza Brinell (HB) e então convertida para os valores em dureza Rockwell B (HRB) a partir da tabela que pode ser encontrada no endereço virtual da Steel Express. Os valores encontrados com base nos ensaios práticos em contraste com a os valores de dureza padrão do aço SAE 1020 trefilado são ilustrados pela Gráfico 1, Gráfico 2 e Gráfico 3.



**Gráfico 1 - Ensaio de Dureza realizado no corpo de prova unido em 180º em contraste à faixa dureza padrão do Aço SAE 1020 trefilado**  
Fonte: Autoria própria.



**Gráfico 2 - Ensaio de Dureza realizado no corpo de prova unido em 90º em contraste à faixa de dureza padrão do Aço SAE 1020 trefilado**  
 Fonte: Autoria própria.



**Gráfico 3 - Ensaio de Dureza realizado no corpo de prova unido em 60º em contraste à faixa de dureza padrão do Aço SAE 1020 trefilado**  
 Fonte: Autoria própria.

Ao realizar o ensaio de dureza nos corpos de prova com angulações, não houve a possibilidade de varrer a mesma proporção de área devido ao início da curva dos tubos, impossibilitando que o ensaio fosse eficaz. Para estes foram considerados um *range* de -3 à 6 na escala adotada.

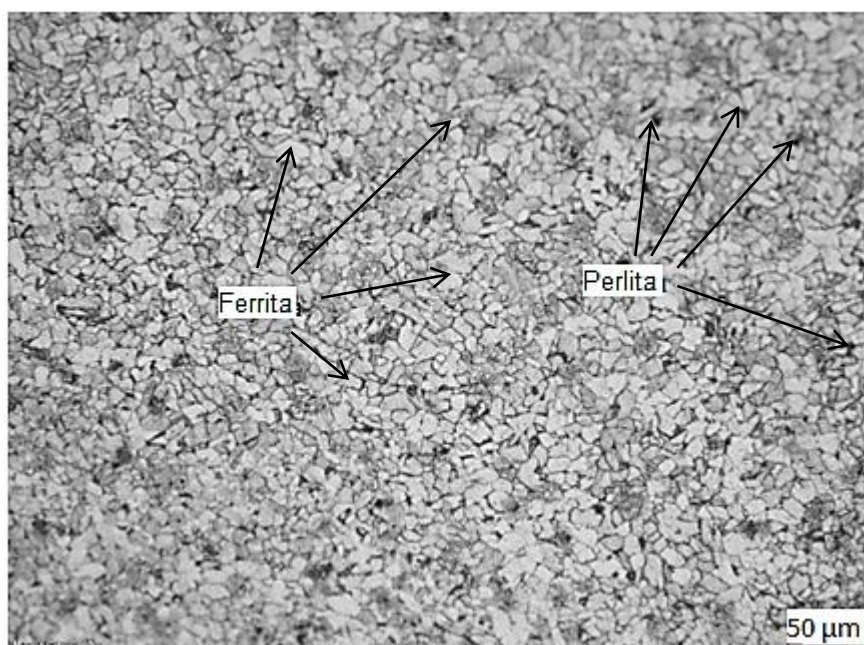
Nota-se que na posição zero é evidenciada uma dureza elevada em relação a outras posições. De acordo com Modenesi (2012), o processo de soldagem MAG apresenta temperatura de processo mais baixa em relação a outros processos, logo o metal de solda apresenta uma densidade de deslocação elevada, ocasionando um aumento no limite de escoamento, caracterizando a zona fundida como mais resistente que o metal base.



Em contrapartida a baixa dureza na zona termicamente afetada é notada, resultado do aumento dos grãos causados pelo recozimento. O recozimento resulta no alívio das tensões locais causando a perda de resistência mecânica.

#### 4.2.3 Ensaio Metalográfico

Do ensaio metalográfico realizado na amostra retirada do metal base (MB) do corpo de prova de aço SAE 1020 foi obtido fotografias com a ampliação de 20 X. Através da análise microscópica da amostra, observou-se presente a fases ferrita e perlita, identificados na Figura 24.



**Figura 24 - Micrografia com ampliação de 20 X do Metal Base**  
**Fonte: Autoria própria.**

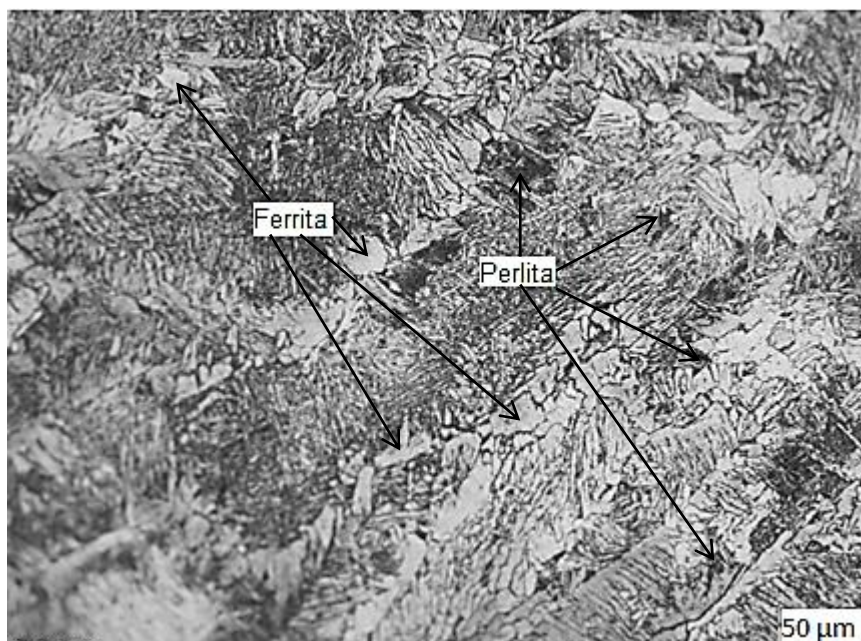
Segundo Callister (2007), a ferrita é definida como a solução sólida do carbono em ferro alfa enquanto a perlita se caracteriza pela presença de grãos chamados de colônias, e com camadas internas orientadas, sendo as camadas claras e mais grossas representadas pela ferrita e as lamelas finas pela cementita.

Da Figura 25, pode-se observar a amostra retirada do cordão de solda com ampliação de 5 X, sendo essas fotografias concentradas inteiramente no cordão de solda não contemplando a ZTA.



**Figura 25 - Micrografia com ampliação de 5 X do cordão de solda**  
Fonte: Autoria própria.

Para uma análise mais precisa temos a Figura 26, mostra o cordão de solda com ampliação de 20 X.

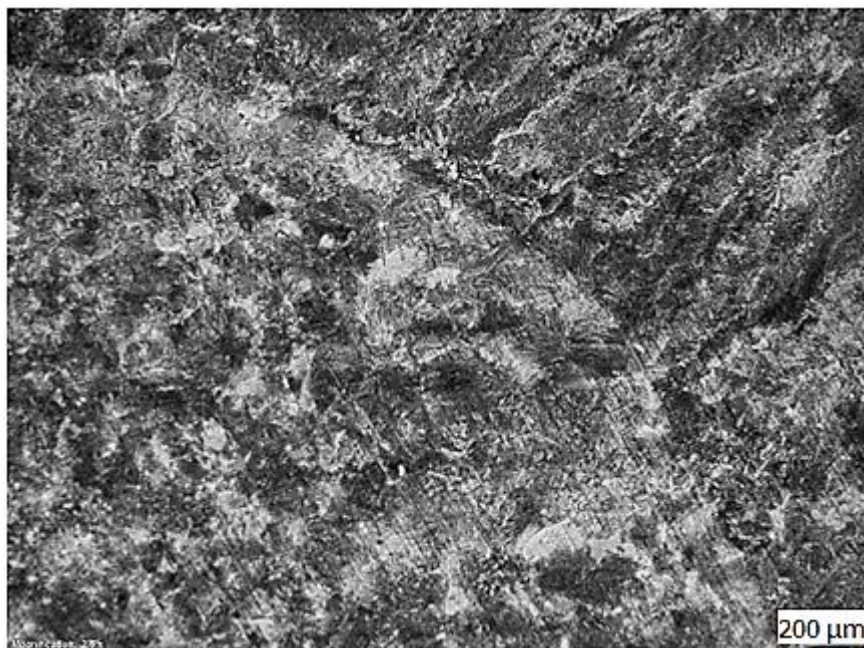


**Figura 26 - Micrografia com ampliação de 20 X do cordão de solda**  
Fonte: Autoria própria.

Como cordão de solda de material AWS A5 18 ER70S-6 forma uma microestrutura basicamente de ferrita e perlita quando fundido, se equivale ao Aço

SAE 1020, diferenciando-se apenas por apresentar uma granulometria grosseira resultante da elevada energia térmica aplicada durante o processo de soldagem.

Na Figura 27 ilustra a micrografia da ZTA (zona termicamente afetada) com ampliação de 5 X.



**Figura 27 - Micrografia com ampliação de 5 X da Zona Termicamente Afetada**  
**Fonte: Autoria própria.**

Para obter uma análise mais precisa sobre o tamanho de grãos comparado com os grãos obtidos da amostra do metal base temos a análise metalográfica da ZTA (zona termicamente afetada) com aumento 20 X, ilustrado pela Figura 28.



**Figura 28 - Micrografia com ampliação de 20 X da Zona Termicamente Afetada**  
**Fonte: Autoria própria.**

Em comparação da Figura 28 (ZTA 20 X) com a Figura 24 (MB 20 X), nota-se o crescimento dos grãos na ZTA (zona termicamente afetada), ocorrente devido ao fenômeno de recozimento dos grãos (ESAB, 2005).

#### 4.2.4 Ensaio de Tração

Houve a tentativa de ensaiar o corpo de prova nas condições baseadas na metodologia, mas ocorreu a degradação das extremidades deste, tornando o ensaio impreciso. Logo os resultados deste ensaio foram simulados por meio de cálculos devido a falta de aparelhos adequados para a realização do ensaio de maneira correta, sem que houvesse a degradação do corpo de prova gerando resultados incorretos.

Os resultados dos ensaios de tração foram obtidos teoricamente por meio de cálculos aproximados. Para a maioria dos aços, a obtenção do Limite e Resistência a Tração a partir da dureza Brinell é dada pela Equação 5. A equação utilizada é composta pelo produto da constante pela dureza medida na escala Brinell (CALLISTER, 2007).

$$LRT = 3,45 \times HB \quad (5)$$

Para possibilitar a execução dos cálculos, prosseguiu-se com as conversões das escalas durezas Rockwell B (HRB) para escala de dureza Brinell (HB) a partir da Tabela encontrada na literatura virtual da Steel Express. Desta aplicou-se os menores valores de dureza obtidos em dureza Brinell na Equação 9, visto que o Limite de Resistência a Tração é mensurado a partir da menor resistência, onde que teoricamente ocorrerá a fratura.

Foi selecionado o corpo de prova unido pelas extremidades visto que este obteve menores resultados de dureza e conseqüentemente valores de *LRT* (Limite de Resistência à Tração) inferiores. Na Tabela 7 é ilustrado o menor resultado obtido de Dureza Rockwell B, e então convertido à escala Brinell para obtenção do *LRT* (Limite de Resistência à Tração).

**Tabela 7 - Sequência de resultados obtidos**

<b>Corpo de Prova</b>	<b>Dureza em Rockwell B (HBR)</b>	<b>Dureza em Brinell (HB)</b>	<b>Limite de Resistência a Tração (<i>LRT</i>) (MPa)</b>
180°	67	114	393,3

**Fonte: Autoria própria.**

A resistência à tração é um dos parâmetros importantes para a engenharia, visto que este determina os esforços suportados pelas estruturas e dispositivos mecânicos (GARCIA, SPIM, DOS SANTOS, 2012).

Os valores de limite de resistência encontrados foram aceitáveis, mesmo partindo de aproximações e considerações aplicadas devido à falta de equipamento específico para o ensaio prático deste.

## 5 CONCLUSÕES

A proposta em realizar a união entre tubos com diferentes angulações foi abrangente, visto que representa situações reais. Os corpos de prova devidamente trabalhados foram expostos a ensaios e análises mecânicas garantindo e quantificando suas propriedades mecânicas pós processos de soldagens, comprovando a segurança da estrutura em esforços submetidos em competições.

Analisou-se a partir dos ensaios não destrutivos a qualidade da solda, por se ter utilizado a soldagem MAG obteve uma solda limpa possuindo em apenas alguns corpos de prova a presença de respingos que puderam ser observados no ensaio visual. O corpo de prova que obteve maior incidência de porosidade e mordeduras se deu pela dificuldade do processo de soldagem, por se tratar de uma angulação inclinada e podendo ser resultado de um corte “boca de lobo” dimensionado com tolerâncias flexíveis. Em contra partida na união dos tubos pela extremidade houve a presença quase insignificante de porosidade analisada somente a partir do ensaio com líquidos penetrantes, reiterando a qualidade do processo de soldagem.

O ensaio destrutivo de metalografia demonstrou o aumento dos grãos na zona termicamente afetada, o que já era esperado, causando a perda de propriedades mecânicas comprovadas pelo ensaio de dureza. Da metalografia observou que o arame de solda (AWS A5 18 ER70S-6) utilizado favoreceu a formação de ferrita e perlita, semelhante ao encontrado no metal base (Aço SAE 1020).

A geometria do cordão de solda auxiliou a obtenção de valores de diluição, esses os quais foram notavelmente positivos comparados aos valores médios aproximados desse processo de soldagem, reintegrando a boa qualidade e boa aceitação ao processo de soldagem MAG com arame AWS A5 18 ER70S-6.

Do ensaio destrutivo de dureza obteve os valores quantitativos de elevado grau de importância do trabalho, este teve por função encontrar a alteração das propriedades mecânicas resultantes do processo de soldagem e ainda a partir deste ensaio obteve o Limite de Resistência à Tração, esses foram fundamentais para comparação entre os Aços SAE 1018 e Aços SAE 1020.

O estudo realizado sobre as propriedades mecânicas do Aço SAE 1020 antes do processo de soldagem obteve resultados com divergências de aproximadamente 4% em relação ao Aço SAE 1018, e pós processo de soldagem

de aproximadamente 9,6% em relação ao Aço SAE 1018 isento de cordões de solda. Os valores obtidos foram relativamente pequenos, o que torna viável a utilização do Aço SAE 1020 para a fabricação da estrutura do veículo Baja, além disso, deve ser levado em conta o preço mais razoável e a acessibilidade em cidades interioranas quando comparado ao Aço SAE 1018.

## REFERÊNCIAS

ARCELORMITTAL. **Guia do aço**. Disponível em: <[brasil.arcelormittal.com.br](http://brasil.arcelormittal.com.br)> Acesso em: 23 de abril 2017.

BAJA SAE BRASIL. **Histórico do Projeto Baja SAE**. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/baja-sae-brasil>> Acesso em: 06 de set. 2016.

CALLISTER, Jr., W.D. **Materials Science and Engineering**. 7 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica**. McGraw Hill, 1986.

COLPAERT, HUBERTUS. **Metalografia dos produtos comuns**. 4. ed. revista e atualizada. São Paulo: Editora Blucher, 2008.

ESAB. **Apostila de Soldagem MIG/MAG**. Disponível em: <<http://www.esab.com.br/>>. Acesso em: 25 de abril 2017.

ESAB. **Apostila Metalurgia da Soldagem**. Disponível em: <<http://www.esab.com.br/>>. Acesso em: 20 de abril 2017.

FORTE, C. **Soldagem MIG / MAG – traduzido e adaptado**. Contagem: ESAB, 2005.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HIDRO BAJA FAHOR. **Projeto: Equipe Hidro Baja FAHOR**. Disponível em: <<http://hidrobaja.fahor.com.br/equipe/brasil>> Acesso em: 06 de set. 2016.



**INSTITUTO DE SOLDAGEM E MECATRÔNICA.** Disponível em:  
<<http://www.labsolda.ufsc.br/>>. Acesso em: 25 de out. 2016.

JÚNIOR, Lima et al. **Caracterização microestrutural e mecânica de juntas soldadas utilizando os processos GTAW, FCAW e SMAW.** 2013.

**LÍQUIDOS PENETRANTES.** Disponível em:  
<<http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/andreucci/LP-2014.PDF>>. Acesso em: 25 de out. 2015.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem Fundamento e Tecnologia.** 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade dos aços transformáveis.** Belo Horizonte, 2012.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo Villani. **Soldagem I Introdução aos Processos de Soldagem.** Belo Horizonte, 2006.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à metalurgia da soldagem.** Belo Horizonte: UFMG, 2012.

NOGUEIRA, Romário Maurício Urbanetto et al. **Variabilidade do cordão de solda nos processos de soldagem MIG/MAG e arame tubular.** Florianópolis: UFSC, 2015.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas.** Bookman Editora, 2013

PESSOA, A. R. P. et al. Seleção de parâmetros através do método Taguchi para soldagem de revestimento com ligas de níquel pelo processo MIG/MAG. **Soldag. insp.** (Impr.) [online]. 2010, vol.15, n.4, pp. 317-324. ISSN 0104-9224. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242010000400009>>. Acesso em: 6 de nov. 2015.

**PORTAL BRASILEIRO DA SOLDAGEM.** Disponível em:  
<<http://www.infosolda.com.br/>>. Acesso em: 22 de out. 2016.

PORTAL FATOR BRASIL. **Estudantes cariocas e capixabas constroem nove carros para a Competição Baja SAE BRASIL- Petrobras.** Disponível em: <<http://www.revistafator.com.br>>. Acesso em: 07 de set. 2016

**PROCESSOS DE SOLDAGEM.** Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/artigos>>. Acesso em: 27 de out. 2016.

RODRIGUES, Luciano Monteiro et al. **Estudo da microestrutura e da microdureza dos aços 1020 e 1060.** Cadernos UniFOA, v. 1, n. 2, p. 39-44, 2014.

SAE BRASIL. **Requisitos Gerais do Veículo.** Disponível em: <[http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas\\_estudantis/arquivos/RBSB%205%20-%20Requisitos%20Gerais%20do%20Veiculo%20-%20Emenda%203.pdf](http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas_estudantis/arquivos/RBSB%205%20-%20Requisitos%20Gerais%20do%20Veiculo%20-%20Emenda%203.pdf)> Acesso em: 10 de out. 2016.

SAE BRASIL. **Requisitos Mínimos de Segurança.** Disponível em: <[http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas\\_estudantis/arquivos/RBSB\\_7\\_-\\_Requisitos\\_Minimos\\_de\\_Seguranca\\_-\\_Emenda\\_3.pdf](http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas_estudantis/arquivos/RBSB_7_-_Requisitos_Minimos_de_Seguranca_-_Emenda_3.pdf)> Acesso em: 10 de out. 2016.

STEEL EXPRESS. **Conversão de dureza do aço.** Disponível em: <[stelexpress.co.uk/steel-hardness-conversion](http://stelexpress.co.uk/steel-hardness-conversion)> Acesso em 25 de mar. 2017.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia.** 8. reimpressão. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992.