

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Avaliação da soldabilidade do aço revestido com  
liga Zn-Fe e submetido ao processo de  
estampagem a quente.**

Marcus Vinícius Dias da Cruz  
Pedro Moreira Barbosa Fontes

Orientadores: Hector Reynaldo Meneses Costa  
Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

**Rio de Janeiro  
2019**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Avaliação da soldabilidade do aço revestido com  
liga Zn-Fe e submetido ao processo de  
estampagem a quente.**

Marcus Vinícius Dias da Cruz  
Pedro Moreira Barbosa Fontes

Projeto final apresentado em cumprimento às  
normas do Departamento de Educação Superior do  
CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof.º Hector Reynaldo Meneses Costa  
Prof.º Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

**Rio de Janeiro  
2019**

C957 Cruz, Marcus Vinícius Dias da.

Avaliação da soldabilidade do aço revestido com liga Zn-Fe e submetido ao processo de estampagem a quente / Marcus Vinícius Dias da Cruz [e] Pedro Moreira Barbosa Fontes – 2019.

ix, 71f. : il. color., grafs., tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação). Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2019.

Bibliografia: f. 69-71.

Orientador: Hector Reynaldo Meneses Costa [e] Ricardo Alexandre Amar de Aguiar.

1. Engenharia mecânica. 2. Tecnologia de materiais. 3. Solda e soldagem. 4. Metais - Soldabilidade. I. Fontes, Pedro Moreira Barbosa. II. Costa, Hector Reynaldo Meneses (Orient.). III. Aguiar, Ricardo Alexandre Amar de (Orient.). IV. Título.

CDD 621

# **TERMO DE APROVAÇÃO**

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos Professores Orientadores Hector Reynaldo e Ricardo Aguiar, pela oportunidade, orientação, dedicação e clareza para sanar nossas dúvidas e nos impulsionar sempre a obter o melhor possível de nós mesmos para o projeto.

Agradecemos ao aluno Doutorando Daniel Casassola, pela valiosa ajuda e instrução tanto na parte prática, quanto na bibliográfica.

Agradecemos a Companhia Siderúrgica Nacional, pela oportunidade única de pesquisa e fornecimento de material.

Agradecemos ao Professor Luis Felipe Guimarães pela solicitude e disponibilidade para a realização de todos os ensaios de cisalhamento e acesso às dependências do LAMAT.

Agradecemos ao Engenheiro e Técnico Hiron Yamada do LAMAT, pela extraordinária solicitude, orientação e esmero para a realização do preparo de amostras, microscopia e ensaio de microdureza. Da mesma forma agradecemos ao Engenheiro e Técnico Marcelo Avelas do LAMAT pela orientação e auxílio na etapa de corte e preparação das amostras.

Agradecemos a todo o corpo docente do CEFET-RJ por todos os anos de sabedoria passados a nós, alunos. Agradecemos também ao CEFET como instituição, pela estrutura fornecida e oportunidade de vida única.

Eu, Marcus Vinícius, agradeço à minha família pelo suporte e estrutura, amigos pelo companheirismo e à minha dupla, Pedro Fontes, por “nunca deixar a peteca cair”.

Eu, Pedro Fontes, agradeço primeiramente à minha família, que sempre esteve lá por mim, torcendo e desejando meu sucesso. Ao meu grande e querido amigo, Antônio Brust, pelo suporte emocional e amizade incondicional. Aos meus amigos por me proporcionarem momentos de reflexão e, por último, mas não menos importante, à minha dupla, Marcus Vinícius, pela paciência, comprometimento e acuidade para com o projeto.

Agradecemos, por último, à força maior do nosso universo, que nos inspira e nos faz notar que a vida é boa.

## RESUMO

O presente projeto visa ampliar os conhecimentos quanto às condições de soldabilidade de chapas de Aço GA, ligas de Zn e Fe, por meio de pesquisa onde foram testados diferentes parâmetros de solda e suas influências para a união das chapas por meio do processo de solda por resistência. Os principais parâmetros avaliados foram a corrente e o tempo de solda. Foi utilizado um equipamento de soldagem estacionária de 75 kVA. Foram utilizados corpos de prova de aço GA de 1,8mm de espessura com a finalidade de avaliar quais os parâmetros que possibilitaram uma fusão da junta soldada e a formação de lente, a partir do ensaio de resistência a tração, ensaios de microdureza e medição do diâmetro da lente de solda, sendo que a combinação de valores superiores a 65% da potência da máquina e 20 ciclos de tempo de solda possibilitou a formação de lentes com fusão evidente.

Palavras-chaves: Soldagem por Ponto. Soldabilidade. Aço GA. Ensaio de Tração. Microdureza. Parâmetros de Solda.

## **ABSTRACT**

This project aims to expand the knowledge about the weldability conditions of GA Steel sheets, Zn-Fe alloys, through research where different welding parameters were tested and their influence on the joining of the plates through the resistance welding process. The main parameters evaluated were current and welding time. A 75 kVA stationary welding equipment was used. GA steel specimens of 1.8mm thickness were used to evaluate which parameters allowed the fusion of the welded joint and the lens formation from the tensile strength test, microhardness tests and diameter of the welding lens, and the combination of values greater than 65% of the machine power and 20 welding time cycles allowed the formation of lenses with evident fusion.

**Keywords:** Spot welding. Weldability. GA steel. Traction test. Microhardness. Welding Parameters.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo do ciclo de soldagem. ....	6
Figura 2: Ciclo de soldagem. ....	7
Figura 3: Perfis de resistência elétrica e de temperatura. ....	8
Figura 4: Desenho com dimensões necessárias para corpos de prova para ensaio de cisalhamento. ....	10
Figura 5: Corpos de Prova. ....	11
Figura 6: Demonstrativo de Junta Soldada. ....	11
Figura 7: Figura do aparato para máquina estacionária de soldagem. ....	13
Figura 8: Medidor de parâmetros Miyachi MM-380A. ....	14
Figura 9: Sensores para medição de corrente e tensão. ....	14
Figura 10: Máquina de ensaio de tração INSTRON 5985. ....	15
Figura 11: Corpos de Prova de 60% após ensaio de cisalhamento. ....	18
Figura 12: Corpos de prova que sofreram evidente expulsão de material. ....	19
Figura 13: Pontos para medição da microdureza. ....	20
Figura 14: Corpos de prova soldados. ....	21
Figura 15: Momento de rompimento no ensaio de cisalhamento. ....	26
Figura 16: Gráfico Carga x Alongamento do CP60. ....	27
Figura 17: Gráfico Carga x Alongamento do CP65. ....	27
Figura 18: Gráfico Carga x Alongamento do CP70. ....	28
Figura 19: Gráfico Carga x Alongamento do CP75. ....	28
Figura 20: Gráfico Carga x Alongamento do CP80. ....	29
Figura 21: Gráfico Carga x Alongamento do CP85. ....	29
Figura 22: Gráfico Carga x Alongamento do CP90. ....	30
Figura 23: Gráfico Carga x Alongamento do CP 10cy. ....	31
Figura 24: Gráfico Carga x Alongamento do CP 15cy. ....	31
Figura 25: Gráfico Carga x Alongamento do CP 20cy. ....	32
Figura 26: Gráfico Carga x Alongamento do CP 25cy. ....	32
Figura 27: Gráfico Carga x Alongamento do CP 30cy. ....	33
Figura 28: Gráfico Carga x Alongamento do CP 65% 20 cy T1, T2 e T3. ....	34
Figura 29: Gráfico Carga x Alongamento do CP 65% 35 cy T1, T2 e T3. ....	34



Figura 30: Gráfico Carga x Alongamento do CP 65% 30 cy T1, T2 e T3.....	35
Figura 31: Gráfico Carga x Alongamento do CP 70% 20 cy T1, T2 e T3.....	35
Figura 32: Gráfico Carga x Alongamento do CP 70% 25 cy T1, T2 e T3.....	36
Figura 33: Gráfico Carga x Alongamento do CP 70% 30 cy T1, T2 e T3.....	36
Figura 34: Gráfico Carga x Alongamento do CP 75% 20 cy T1, T2 e T3.....	37
Figura 35: Gráfico Carga x Alongamento do CP 75% 25 cy T1, T2 e T3.....	37
Figura 36: Gráfico Carga x Alongamento do CP 75% 30 cy T1, T2 e T3.....	38
Figura 37: Gráfico Carga x Alongamento do CP 80% 20 cy T1, T2 e T3.....	38
Figura 38: Gráfico Carga x Alongamento do CP 80% 25 cy T1, T2 e T3.....	39
Figura 39: Gráfico Carga x Alongamento do CP 80% 30 cy T1, T2 e T3.....	39
Figura 40: Gráfico Carga x Alongamento do CP 85% 20 cy T1, T2 e T3.....	40
Figura 41: Gráfico Carga x Alongamento do CP 85% 25 cy T1, T2 e T3.....	40
Figura 42: Gráfico Carga x Alongamento do CP 85% 30 cy T1, T2 e T3.....	41
Figura 43: Medição da lente de solda na posição D1.....	42
Figura 44: Medição da lente de solda na posição D2.....	43
Figura 45: Medição da lente de solda.....	43
Figura 46: Medição da lente de solda.....	44
Figura 47: Medição da lente de solda.....	44
Figura 48: Amostra 65 % - 20 cy, ampliação de 12,5 x.....	46
Figura 49: Amostra 65 % - 25 cy, ampliação de 12,5 x.....	46
Figura 50: Amostra 65 % - 30 cy, ampliação de 12,5 x.....	47
Figura 51: Amostra 85 % - 20 cy, ampliação de 12,5 x.....	47
Figura 52: Amostra 85 % - 25 cy, ampliação de 12,5 x.....	48
Figura 53: Amostra 85 % - 30 cy, ampliação de 12,5 x.....	48
Figura 54: Indentação dos pontos de microdureza na amostra 65 % - 25 cy, ampliação de 12,5 x.....	49
Figura 55: Indentação dos pontos de microdureza na amostra 65 % - 25 cy na transição metal base/zta, ampliação de 100 x.....	49
Figura 56: Gráfico de curva das condições de soldabilidade do aço GA com valores de carga máxima de ruptura referente à primeira fase.....	51
Figura 57: Gráfico de média de cargas máximas de amostras 20 cy e desvio padrão....	52
Figura 58: Gráfico de média de cargas máximas de amostras 25 cy e desvio padrão....	53

Figura 59: Gráfico de média de cargas máximas de amostras 30 cy e desvio padrão....	53
Figura 60: Gráfico de curva das condições de soldabilidade do aço GA com valores médios de carga de ruptura.....	54
Figura 61: Corpo de Prova 70 % - 25 cy.....	57
Figura 62: Corpo de Prova 75 % - 20 cy.....	57
Figura 63: Gráfico de curva das condições de soldabilidade do aço GA com valores de diâmetro de lente.....	58
Figura 64 – Gráfico de média de tamanho de diâmetros da lente de amostras 20 cy e desvio padrão.....	60
Figura 65 – Gráfico de média de tamanho de diâmetros da lente de amostras 25 cy e desvio padrão.....	61
Figura 66 – Gráfico de média de tamanho de diâmetros da lente de amostras 30 cy e desvio padrão.....	61
Figura 67 – Gráfico de curva das condições de soldabilidade do aço GA com valores médios de diâmetro de lente.....	62
Figura 68: Corpos de prova 75-20 T3, 75-25 T3, 80-25 T3 e 85-25 T2.....	63
Figura 69: Corpos de prova 65-25 T2, 65-30 T2 e 70-30 T3.....	63
Figura 70: Gráfico de microdureza HV03 x Região da Lente para CP's de 65%.....	65
Figura 71 - Gráfico de microdureza HV03 x Região da Lente para CP's de 85%.....	65
Figura 72 - Perfil de Microdureza de Aço Bifásico.....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dimensões do corpo de prova. ....	11
Tabela 2: Especificações técnicas da máquina de solda.....	12
Tabela 3 - Especificações técnicas da máquina de ensaio de tração. ....	15
Tabela 4: Requisitos normativos para aço GA baixo carbono. ....	16
Tabela 5: Resultados para a série de 60%. ....	22
Tabela 6: Resultados para a série de 65%. ....	22
Tabela 7: Resultados para a série de 70%. ....	22
Tabela 8: Resultados para a série de 75%. ....	23
Tabela 9: Resultados para a série de 80%. ....	23
Tabela 10: Resultados para a série de 85%. ....	23
Tabela 11: Resultados para a série de 90%. ....	24
Tabela 12: Resultados para a série de 20 cy da segunda fase.....	24
Tabela 13: Resultados para a série de 25 cy da segunda fase.....	25
Tabela 14: Resultados para a série de 30 cy da segunda fase.....	25
Tabela 15: Medições dos diâmetros das lentes de soldas.....	41
Tabela 16: Medições dos diâmetros das lentes de soldas.....	42
Tabela 17: Medições dos diâmetros das lentes de soldas.....	42
Tabela 18: Relação do diâmetro das lentes de solda obtidas através do microscópio óptico. ....	45
Tabela 19: Resultado do Teste de Cisalhamento para aços GA e GI 780 por Tumuluru. ....	55
Tabela 20: Relação entre Diâmetros Nominais T1 e Diâmetro Crítico previsto em norma.....	56
Tabela 21: Relação entre Diâmetros Nominais T2 e T3 e Diâmetro Crítico previsto em norma.....	59
Tabela 22: Comparação entre diâmetros da lente obtidos via microscopia e via paquímetro.....	64

## SUMÁRIO

1.	Introdução.....	1
1.1.	Motivação .....	2
1.2.	Justificativa .....	3
1.3.	Objetivos.....	3
1.4.	Organização do trabalho .....	3
2.	Revisão Bibliográfica .....	5
2.1.	Solda por Resistência.....	5
2.1.1.	Ciclo de soldagem .....	6
2.1.1.1.	Período de Compressão .....	7
2.1.1.2.	Período de Soldagem.....	7
2.1.1.3.	Tempo de espera e resfriamento .....	8
2.2.	Processo de <i>Galvannealing</i> .....	9
3.	Metodologia Experimental .....	10
3.1.	Corpos de Prova.....	10
3.2.	Instrumental .....	12
3.2.1.	Máquina de Solda.....	12
3.2.2.	Equipamento de Calibração .....	13
3.2.3.	Máquina de Ensaio de Tração .....	15
3.2.4.	Durômetro .....	16
3.2.5.	Microscópio Óptico.....	16
3.3.	Parâmetros Normativos.....	16
3.4.	Métodos .....	17
3.4.1.	Primeira Fase.....	17
3.4.2.	Segunda Fase.....	18

4.	Resultados Obtidos.....	21
4.1.	Solda por Ponto.....	21
4.2.	Ensaio de Cisalhamento.....	26
4.2.1.	Primeira Fase de Ensaios.....	26
4.2.2.	Segunda Fase de Ensaios.....	33
4.3.	Medição das Lentes de Solda.....	41
4.4.	Micrografia Óptica e Microdureza.....	45
5.	Discussão.....	50
5.1.	Resistência Mecânica.....	50
5.1.1.	Primeira Fase.....	50
5.1.2.	Segunda Fase.....	52
5.2.	Diâmetro de Lente de Solda.....	55
5.2.1.	Primeira Fase.....	55
5.2.2.	Segunda Fase.....	59
5.2.3.	Análise dos Diâmetros no Microscópio Óptico.....	64
5.3.	Análise de Microdureza.....	64
6.	Conclusão.....	67
7.	Trabalhos Futuros.....	68
8.	Referências Bibliográficas.....	69

# Capítulo 1

## 1. Introdução

“A solda por resistência, também conhecida como solda a ponto ou solda a ponto por resistência, é um processo termoelétrico no qual a interface das peças de metal a serem unidas é aquecida pela passagem de uma corrente elétrica pelas peças por um período controlado com precisão e sob pressão controlada” (ARC SERVICE, 2013).

Segundo Pouranvari & Marrashi (2013), tal corrente é responsável pela elevação da temperatura através do efeito Joule. A geração de calor ocorrerá na resistência de contato eletrodo/peça, peça/peça e peça/eletrodo.

Este tipo de processo é largamente utilizado na indústria automobilística para soldagem de chapas, pois proporciona um excelente custo-benefício em termos de agilidade e custo já que, além de outros fatores, não exige metal de adição. A falta deste último ainda proporciona menor peso para o automóvel, melhorando seu desempenho e reduzindo o consumo de combustível, ponto importante congruente com as preocupações contemporâneas sobre sustentabilidade. Vem a ser igualmente um processo de alta confiabilidade e facilidade de execução, pois por ser simples e não exigir grande aporte técnico do operador, reduz a possibilidade de falhas provenientes do erro humano.

Segundo Aures (2006), tipicamente cada automóvel possui entre 3000 e 5000 pontos de solda e o custo com equipamento essencial, eletrodos e manutenção é cerca de 5 centavos de dólar por solda. Portanto, o custo para montagem de uma carroceria de um automóvel é cerca de \$150 a \$200 por automóvel, o que é considerado razoável, considerando o custo total de produção de um veículo.

Não obstante, o custo de aquisição dos equipamentos é elevado e pode ultrapassar os valores dos equipamentos de soldagem a arco. Existe a necessidade de instalações auxiliares como: linhas de água, subestações elétricas, equipamentos pneumáticos, etc., além de limitações de dimensões com espessuras de, até aproximadamente, 3 mm.

Exemplos de Soldagem por Resistência:

- Soldagem por Pontos;
- Soldagem por Projeção;
- Soldagem por Costura;
- Soldagem Topo a Topo;
- Soldagem por Resistência por alta frequência.

Alguns fatores são básicos e necessários para que haja a solda por resistência, como pressão mecânica, peças com resistividade elétrica adequada (aços carbono em geral, ligas inoxidáveis, aços galvanizados, ligas de alumínio e magnésio dentre outros não ferrosos como Zn, Cu, Ag e Ni), passagem de corrente elétrica e tempo de contato.

O aço em forma de chapa tem sido o principal material usado na indústria automotiva devido ser facilmente reciclável e unir alta conformabilidade com boa resistência estrutural e baixo custo. A utilização de chapas de aço galvanizado é mais recente, ditando, no caso da indústria brasileira, de 20% em 1996 a 65% em 2006, perante a necessidade de se aumentar a durabilidade dos elementos usando a resistência a corrosão proveniente do método de adição de Zn.

O processo de *Galvannealing* se caracteriza pelo recozimento do revestimento de Zn, que promove uma interdifusão deste com o Fe do substrato, formando diferentes fases intermetálicas de Zn-Fe. Esse método é aplicado principalmente em chapas de aço IF, conferindo maior resistência a esforços mecânicos e corrosão aos mesmos.

## 1.1. Motivação

De acordo com a FENABRAVE, Federação Nacional de Distribuição de Veículos Automotores (2019), o ano de 2018 aponta um crescimento na indústria automobilística brasileira de quase 10% em relação ao ano de 2017, que registrou mais de 2,24 milhões de carros vendidos. A partir desse cenário, se vê necessário um estudo apurado dos parâmetros de solda por ponto (processo mais utilizado na área) em placas de aço GA para a máxima eficiência e aproveitamento na questão dos critérios mínimos aceitáveis por norma.

## **1.2. Justificativa**

O tema foi escolhido devido à experiência obtida nos projetos de Iniciação Científica pelos alunos formandos com a temática de otimização de parâmetros de solda por resistência em placas de aço IF e a expansão desse estudo para placas de aço GA, fornecidas por uma empresa vinculante. O estudo se mostra pertinente atualmente para a constante evolução do setor e do meio acadêmico a partir da geração de conteúdo informativo. Além de ser uma oportunidade para agregar conhecimento para pesquisas acadêmicas futuras e utilização no mercado.

## **1.3. Objetivos**

Este projeto final tem o objetivo estudar a eficiência em soldabilidade por resistência em placas de aço GA por variação dos parâmetros de solda, no caso, tempo de solda e valor de corrente para conjuntos de chapas metálicas, sendo utilizado um equipamento de soldagem estacionária de 75 kVA e corpos de prova de chapas GA com a finalidade de avaliar quais os parâmetros que possibilitarão uma fusão da junta soldada e a formação de lente e desse modo traçar a curva de soldabilidade do referido material, além de ensaios de cisalhamento para medir sua resistência à ruptura, ensaios de microdureza para definir as influências na área da lente de solda e seu entorno e análise macrográfica com microscópio óptico. Para este estudo, foi utilizada como base a norma técnica ANSI/AWS/SAE D8.9-97 por ser adotada pela indústria automotiva na construção de veículos.

## **1.4. Organização do trabalho**

Este projeto final, com ênfase experimental, apresenta um estudo sobre os diferentes resultados de resistência mecânica, soldabilidade e microdureza obtidos a partir da variação dos parâmetros de solda utilizados com o intuito de avaliar a soldabilidade do aço revestido com liga Zn-Fe.



O presente trabalho está dividido em 7 capítulos, conforme descrito abaixo:

- Capítulo I – Introdução e Objetivos;
- Capítulo II – Revisão Bibliográfica;
- Capítulo III – Metodologia Experimental;
- Capítulo IV – Resultados Obtidos;
- Capítulo V – Discussão;
- Capítulo VI – Conclusões;
- Capítulo VII – Trabalhos Futuros.

No capítulo I é apresentado o conceito básico do processo de solda a ponto, sua importância na indústria automobilística e uma síntese sobre o aço GA. Além disso, são apresentadas as motivações e objetivos acerca do trabalho.

No capítulo II segue uma apresentação dos fundamentos do processo de soldagem como o ciclo de soldagem, além de apresentar o papel do revestimento e no que consiste o processo de *galvannealing*.

No capítulo III é mostrado todo o instrumental utilizado na pesquisa, tão bem como suas especificações e o passo – a – passo do projeto que consistiu na operação de soldagem, medição dos valores de corrente e voltagem, ensaio de tração, medição de diâmetro da lente de solda, embutimento das amostras para análise no microscópio ótico e análise de microdureza.

No capítulo IV é apresentado o conjunto dos resultados da dissertação. Os dados obtidos foram os valores de tensão e corrente das operações de solda, os gráficos resultantes do ensaio de cisalhamento com suas respectivas cargas de pico, os valores de diâmetro da lente e os resultados do ensaio de microdureza.

No capítulo V os dados foram analisados e comparados com os da literatura, sendo gerados gráficos e tabelas para melhor avaliação.

No capítulo VI foram apresentadas conclusões acerca dos resultados

Por fim, no capítulo VII foram sugeridas futuras abordagens para aprofundamento do presente estudo.

## Capítulo 2

### 2. Revisão Bibliográfica

#### 2.1. Solda por Resistência

Na soldagem por ponto, dois eletrodos cilíndricos aplicam pressão e permitem a passagem de uma alta corrente elétrica em um ponto concentrado de uma junta sobreposta.

Segundo Modenesi (2011), a soldagem por resistência compreende um grupo de processos nos quais a união de peças metálicas é produzida por superfícies sobrepostas ou em contato topo a topo, pelo calor gerado na junta através do Efeito Joule, resistência à passagem de uma corrente elétrica, e pela aplicação de pressão, ocorrendo assim uma fusão na interface.

Quando o fluxo de corrente cessa, a força de eletrodo é mantida enquanto o metal de solda rapidamente resfria e solidifica. Os eletrodos se afastam após cada solda, que usualmente é efetuada numa fração de segundos. A forma e o diâmetro das lentes de solda formadas são limitados, fundamentalmente, pelo diâmetro e contorno da face do eletrodo. Sobre a geração de calor, uma solda a ponto é efetuada ao pressionar duas ou mais peças sobrepostas enquanto uma corrente elétrica passa através de uma área de contato localizado até aquecer o metal formando uma lente de solda até a temperatura de soldagem (INTERMACHINERY, 2000).

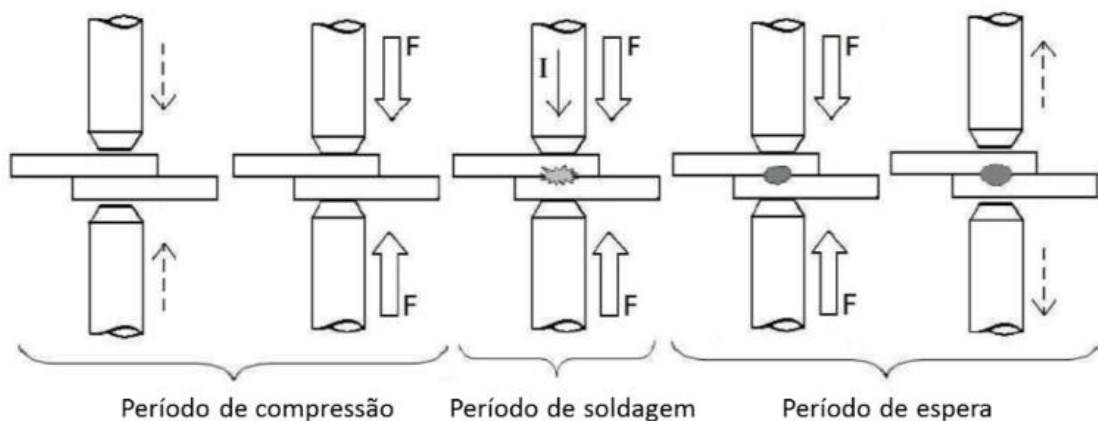
Dentre os principais fatores que contribuem para a qualidade da solda, citam-se:

- Espaçamento entre os Eletrodos;
- Uniformidade dos pontos de solda;
- Presença de rebarbas e ondulações;
- Corrente;
- Tempo;
- Pressão.

### 2.1.1. Ciclo de soldagem

Segundo Govik (2009), os diferentes períodos que ocorrem no processo da soldagem a ponto e demonstrados na Figura 1, a saber:

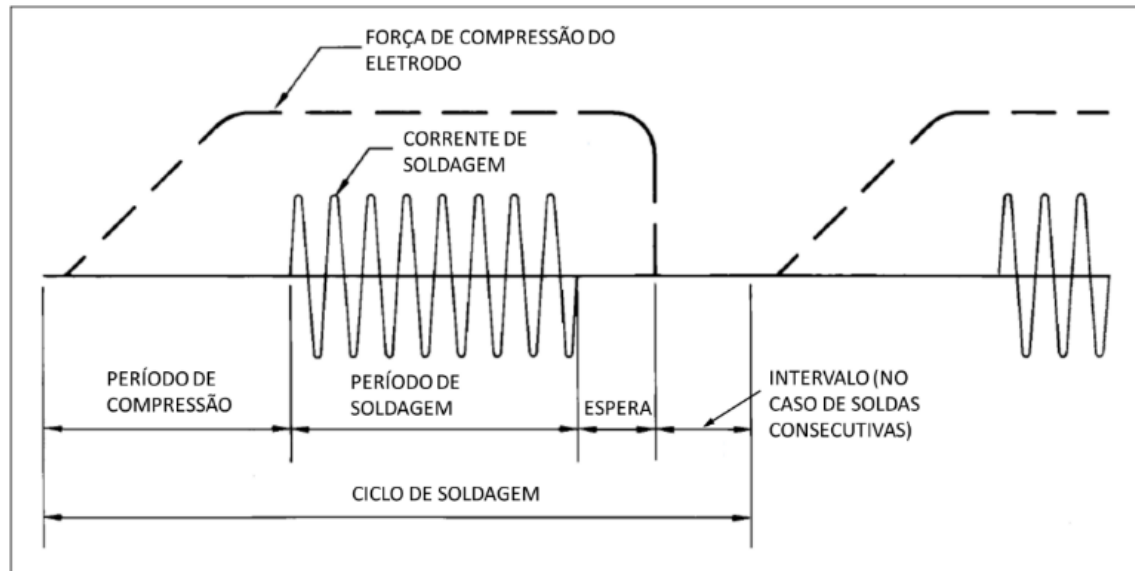
- Período de compressão - Tempo que corresponde à aproximação dos eletrodos e aplicação da pressão determinada até que seja iniciada a aplicação de corrente;
- Período de soldagem - Tempo durante o qual a corrente elétrica é aplicada;
- Período de espera - Tempo durante o qual a pressão é mantida e diminuída, após a cessão da corrente elétrica.



**Figura 1: Exemplo do ciclo de soldagem.**

Fonte: Govik (2009), modificado.

Na Figura 2, observa-se a variação de força de compressão dos eletrodos e de corrente elétrica durante a soldagem.



**Figura 2: Ciclo de soldagem.**  
**Fonte: DOLFI et al (2007), modificado.**

### 2.1.1.1. Período de Compressão

A força de compressão deve ter um equilíbrio de modo que o contato entre as peças a serem unidas não fique prejudicado por falta de força devido às rugosidades inerentes às superfícies e que não haja o fenômeno de expulsão de material durante a fase líquida, o qual ocorre com excessiva força. Zhou & Kai (2014) estudaram o efeito da força de compressão dos eletrodos no processo de solda a ponto.

### 2.1.1.2. Período de Soldagem

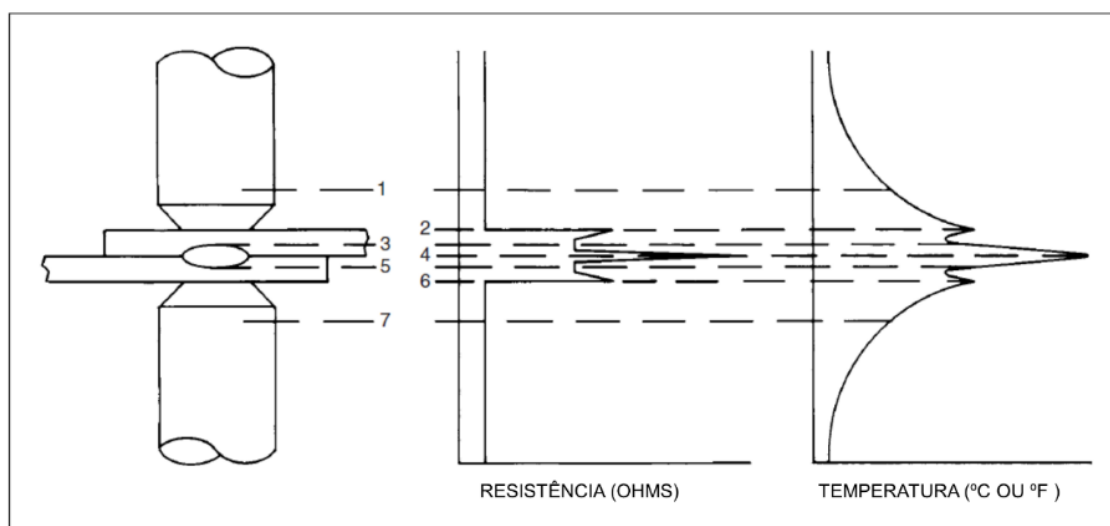
O período de soldagem (Furlanetto, 2004) é definido como o período de passagem de corrente na junta a ser soldada. Normalmente, esse tempo é expresso em ciclos. Um ciclo (cy) equivale a  $1/60$  de segundo, ou seja, 15 ciclos equivalem a  $1/4$  de segundo, considerando a frequência da rede elétrica no Brasil, que é de 60 Hertz.

Conforme afirma Hayat et al.(2009), a carga de ruptura e dureza da lente e da ZTA tendem a aumentar para tempos e/ou correntes de soldagem maiores.

### 2.1.1.3. Tempo de espera e resfriamento

Após a passagem da corrente elétrica, ainda existe continuidade no período de retenção dos eletrodos, ao mesmo tempo em que ocorre o resfriamento da junta soldada. A taxa de resfriamento irá influenciar diretamente na microestrutura e, por conseguinte, resistência da junta.

A resistência à corrente elétrica em interfaces tende a ser maior do que através de um material contínuo, sendo que um perfil padrão de resistências e temperaturas decorrentes é mostrado na Figura 3.



**Figura 3: Perfis de resistência elétrica e de temperatura.**  
**Fonte: DOLFI et al (2007), modificado.**

Conforme Dolfi *et al.*(2007), as magnitudes das resistências de contato números 2 e 6, cuja posição é mostrada na Figura 3, dependem da condição da superfície dos metais base e dos eletrodos, tamanho e contorno da face dos eletrodos, e força de compressão dos mesmos. As resistências de contato são regiões de alta geração de calor, no entanto no contato metal base/eletrodo o sistema de arrefecimento interno dos eletrodos contribui para a diminuição da temperatura.

## 2.2. Processo de *Galvannealing*

Segundo Hayat *et al.*(2011), a indústria automotiva tem usado aços revestidos nos últimos anos. O processo, com o nome de galvanização, é uma prática relativamente antiga, que consiste na adição de Zn na superfície do material e traz diversos benefícios ao elemento no qual se aplica a técnica. O principal motivo para se usar o processo de galvanização é aumentar a durabilidade do componente por torná-lo resistente a corrosão. Outras propriedades, como aumento da resistência mecânica e melhora da aderência da superfície para pinturas e adesivos são notáveis também.

Quando submetido a um processo de soldagem, o revestimento de Zn tem também certo protagonismo no aumento da resistência mecânica e dureza da área da lente de solda. Isso se deve, pois o Zn tem alta condutividade térmica, aumentando as taxas de resfriamento após a solda. Quando o aço em questão tem alta temperabilidade, as altas taxas de resfriamento proporcionam a capacidade de formação de martensita na ZTA, aumentando a dureza e ligeiramente a resistência mecânica da mesma.

De acordo com Fonseca (2006), o processo de *Galvannealing* se caracteriza por uma etapa de recozimento do revestimento de Zn, após o processo de galvanização por imersão a quente. O processo promove uma interdifusão entre o Zn presente no revestimento e o Fe presente no substrato de aço. Isso gera um revestimento totalmente ligado de Zn-Fe constituído de diversos compostos intermetálicos que conferem ao aço melhores propriedades de resistência a corrosão, soldabilidade e aderência a pintura que a chapa revestida com puro Zn (chamado aço GI). Essas propriedades são diretamente almeçadas pela indústria automotiva (DUBOIS, 1995).

## Capítulo 3

### 3. Metodologia Experimental

Nesse capítulo, estão descritos todo o material utilizado, os métodos de operação e por fim, a organização dos processos para a realização do presente estudo.

#### 3.1. Corpos de Prova

Os materiais dos corpos de prova utilizados, no presente estudo, para os ensaios experimentais e de calibração do equipamento foram os aços GA ZF80 revestidos com liga Zn-Fe, fornecidos pela empresa vinculada ao estudo. Suas dimensões são de 140 x 60 mm com 1,8 mm de espessura. O critério para a escolha dessas dimensões vem da norma AWS C1.4M (2009) que especifica as dimensões necessárias para um corpo de prova com espessura de no mínimo 1,3 mm para o ensaio de cisalhamento, conforme mostra a Figura 4 e Tabela 1. A Figura 5 mostra o corpo de prova conforme especificado e na Figura 6 o demonstrativo de uma junta soldada.

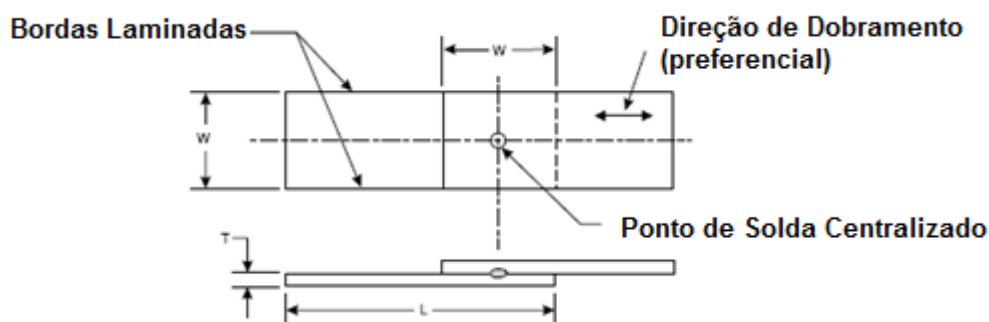
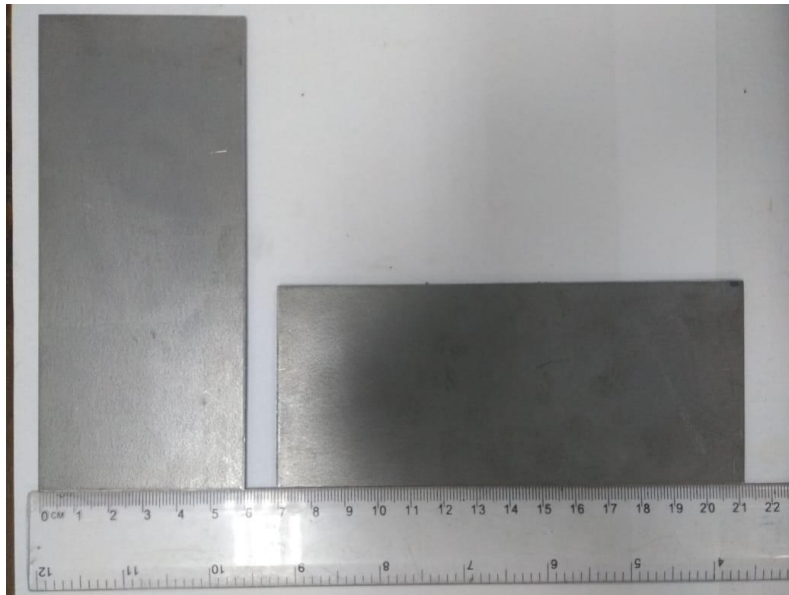
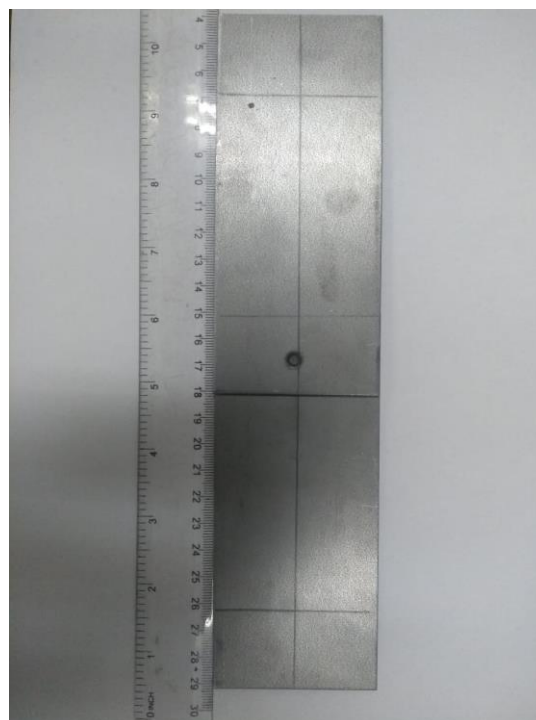


Figura 4: Desenho com dimensões necessárias para corpos de prova para ensaio de cisalhamento.

Fonte: AWS C1.4M (2009), modificado.

**Tabela 1: Dimensões do corpo de prova.**

T (Espessura)	W (Largura)	L (Comprimento)
mm	mm	mm
0.04 a 0.59	25	100
0.60 a 1.29	45	105
1.30 e maiores	60	136

**Fonte: AWS C1.4M (2009), modificado.****Figura 5: Corpos de Prova****Figura 6: Demonstrativo de Junta Soldada.**



## 3.2. Instrumental

Para o projeto proposto foram utilizados os seguintes equipamentos que estão detalhados nos subitens subsequentes:

- Máquina de Solda Arc Service AS 1 .PA 75 / 600;
- Equipamento de Calibração MiyachiMM-380A;
- Máquina de Ensaio de Tração Instron5985;
- Durômetro Instron 422MVD;
- Microscópio Óptico Olympus BX 60M.

### 3.2.1. Máquina de Solda

Para os ensaios de solda por ponto subsequentes, foi utilizada a máquina estacionária, de acionamento pneumático, localizada no LASOL (Laboratório de Soldagem) do CEFET-RJ (Figura 7), apropriada para soldagem de chapa de aço galvanizado de até 2,0 + 2,0 mm, pelo processo de soldagem por Resistência (ponto), equipada com comando eletrônico micro processado modelo HandHeld, opção corrente constante, com painel elétrico, régua de borne, módulo de disparo e leitura de corrente no secundário. A Tabela 2 detalha as características técnicas do equipamento.

**Tabela 2: Especificações técnicas da máquina de solda.**

Modelo	AS 1 .PA 75 / 600
Potência Nominal	75KVA
Tensão Nominal	220VAC
Corrente Nominal	181A
Cabo de Alimentação para 10m	50mm <sup>2</sup>
Potência de Instalação	60KVA
Profundidade Útil	500mm
Pressão Máxima entre os eletrodos a 6 Bar	320Kgf
Pressão Máxima de Água	2,5ATM
Vazão Mínima de Água	25l/min
Temperatura Máxima Entrada de Água	40°C
Temperatura Mínima Entrada de Água	20°C

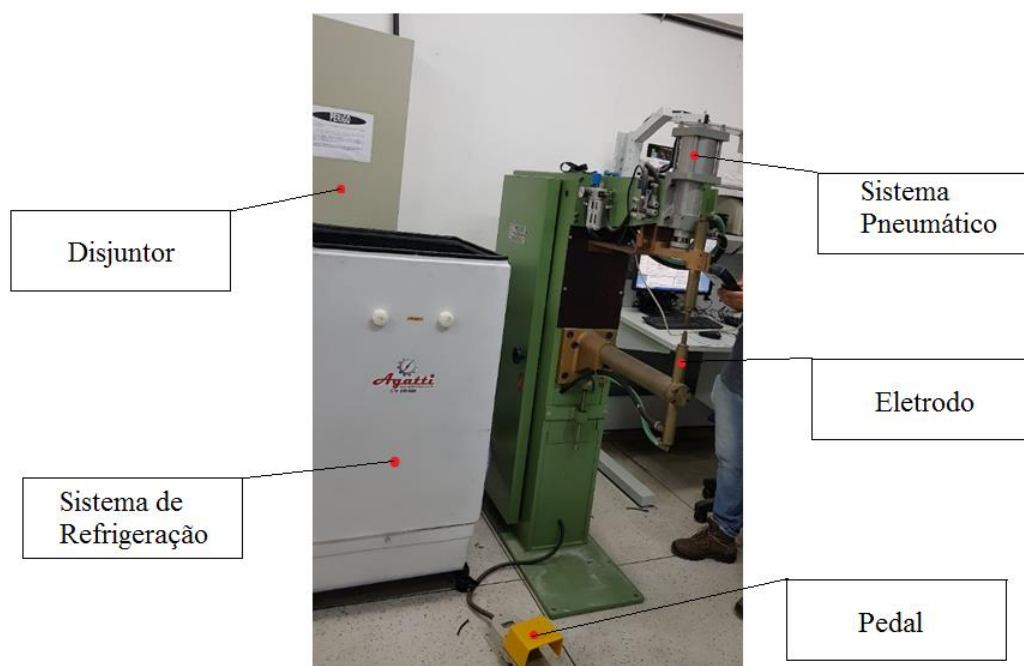


Figura 7: Figura do aparato para máquina estacionária de soldagem.

### 3.2.2. Equipamento de Calibração

Para a medição do tempo, tensão e corrente de soldagem foi utilizado um medidor de parâmetros Miyachi MM-380A e faixa de corrente de 0,01 – 200 kA, pertencente ao LASOL. Para a calibração da corrente se utilizará um sensor corrente digital Miyachi MA-771A, conforme Figura 8. A Figura 9 mostra o modo de instalação das garras para medição de tensão e da cinta toroidal na máquina de solda.



**Figura 8: Medidor de parâmetros Miyachi MM-380A.**



**Figura 9: Sensores para medição de corrente e tensão.**

### 3.2.3. Máquina de Ensaio de Tração

Para o ensaio de cisalhamento, foi utilizada a máquina de ensaio de piso da empresa INSTRON modelo 5985, localizada no LAMAT (Laboratório de Materiais) no CEFET-RJ (Figura 10), apropriada para ensaios em metais e ligas de alta resistência, compósitos avançados, estruturas aeroespaciais e automotivas, prendedores, fixadores e barras de aço, equipada com rolamentos pré-carregados, fusos de esfera de precisão, travessa e viga de base espessas e correias de acionamento com baixo coeficiente de alongamento. A Tabela 3 apresenta as características técnicas do equipamento.

**Tabela 3 - Especificações técnicas da máquina de ensaio de tração.**

Capacidade de Tração	250 kN (56.200 lbf) (25.000 kgf)
Espaço de teste vertical*	1430 mm (56,3 pol.)
Espaço de teste vertical	1930 mm (76,0 pol.)
Precisão da medição de carga	+/-0,5%
Taxa de aquisição de dados	2,5 kHz
Faixa de velocidade	0,00005 a 1016 mm/min



**Figura 10: Máquina de ensaio de tração INSTRON 5985.**

### 3.2.4. Microdurômetro

A medição de microdureza foi realizada no durômetro Instron, modelo 422MVD KnoopVickersTester, localizado no LAMAT, no CEFET-RJ.

### 3.2.5. Microscópio Óptico

A microscopia óptica foi realizada em um microscópio Olympus BX 60M, localizado no LAMAT, no CEFET-RJ.

## 3.3. Parâmetros Normativos

Foram aplicados os requisitos para os parâmetros de soldagem da norma AWS C1.1M/C1.1 (2012). A Tabela 4 apresentam os requisitos de soldagem para o aço GA de baixo carbono e para o aço galvanizado de alta resistência e baixa liga (HSLA).

**Tabela 4: Requisitos normativos para aço GA baixo carbono.**

REQUISITO AWS C1.1M (GA BAIXO CARBONO)	
Espessura metal base (mm)	1,8
Diâmetro da face do eletrodo(mm)	7,94
Força de compressão do eletrodo (kN)	5,34
Tipo de eletrodo (detalhes na norma)	A, B, E, F
Tempo de soldagem (ciclos)	16
Corrente (A)	16500
Sobreposição mínima (mm)	16,8
Diâmetro mínimo da lente(mm)	7,1
Resistência mínima ao cisalhamento (kN)	10,23

**Fonte: AWS C1.1M, modificado.**

## 3.4. Métodos

### 3.4.1. Primeira Fase

Para a realização dos ensaios de solda por ponto, a máquina foi ajustada em seus parâmetros de modo que os valores ficassem os mais próximos possíveis da norma. Foram feitas medições com o medidor Amada Miyachi, para verificação da potência (V) e da corrente (kA).

As potências avaliadas foram de 60%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85% e 90% com tempos de soldagem (medidos em ciclos): 10 ciclos, 15 ciclos, 20 ciclos, 25 ciclos e 30 ciclos a fim de avaliar a lente de solda e o comportamento da chapa de aço ZF80 perante as diferentes condições de solda no ensaio de cisalhamento.

Com a conclusão das soldas por ponto, os corpos de prova foram avaliados visualmente, pois dependendo da potência e do tempo de solda, algumas não apresentaram fusão entre as duas chapas. Quando isso ocorreu, foi considerado que os parâmetros pré-estabelecidos foram insuficientes para a realização do próximo passo da análise, o ensaio de cisalhamento.

Após a análise supracitada, nos corpos de provas aptos foram realizados os ensaios de cisalhamento no LAMAT – Laboratório de Materiais usando uma taxa de carregamento de 5,0mm/min.

Depois da conclusão dos ensaios, os corpos tiveram suas lentes de solda analisadas e medidas por um paquímetro a fim de prover a informação de diâmetro de lente, cuja lente deverá atender às normas especificadas no item 4.3.

Após a execução do ensaio foram avaliadas as seguintes características: pico de carregamento, resistência à tração, alongamento percentual, redução de área, tensão de tração no ponto de ruptura e carregamento no ponto de ruptura.

A partir dos mesmos, foram plotados gráficos para cada ensaio individualmente, tendo como eixo horizontal o alongamento (em mm) e no eixo vertical a carga (em N).

O cruzamento dos dados desses gráficos provenientes das informações obtidas a partir dos relatórios mostrou o comportamento dos corpos prova em relação aos parâmetros utilizados. Baseado nisso, conclusões foram realizadas a fim de comprovar a soldabilidade do material de estudo.

### 3.4.2. Segunda Fase

Após análise preliminar dos resultados obtidos na primeira fase da pesquisa, verificou-se a necessidade de uma melhor seleção do espaço amostral com o intuito de se obter maior precisão nos resultados.

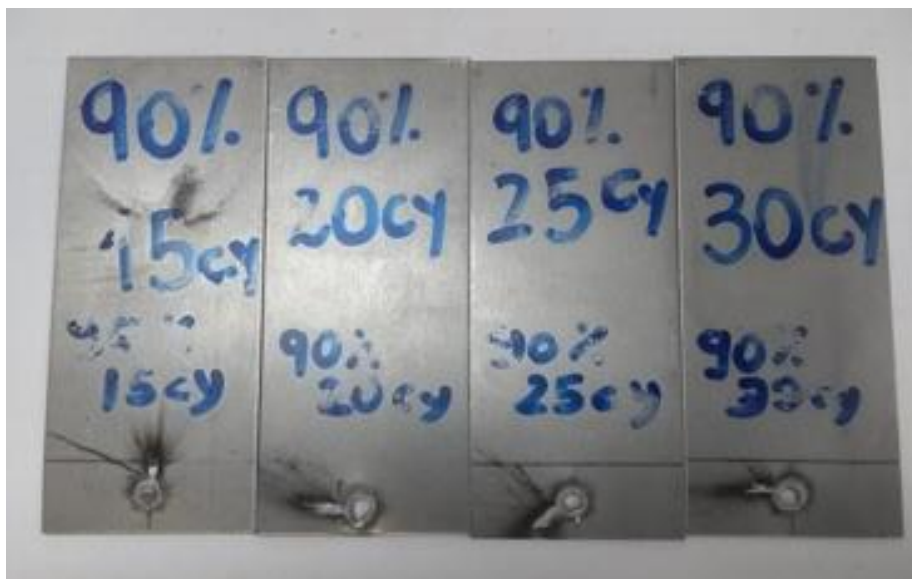
Observou-se que os resultados referentes aos ensaios de 60%, 90% e todas as faixas com tempo de soldagem de 10 ciclos e 15 ciclos não demonstravam resultados apreciáveis à pesquisa.

A Figura 11 exibe os corpos de prova da faixa de 60% após o ensaio de cisalhamento, onde é possível observar a não formação de lente de solda.

A Figura 12 exibe os corpos de prova da faixa de 90 % de potência evidenciando o fenômeno de expulsão de material.



Figura 11: Corpos de Prova de 60% após ensaio de cisalhamento.



**Figura 12: Corpos de prova que sofreram evidente expulsão de material.**

Foi escolhida então uma faixa específica - entre 65% e 85% com tempo de soldagem de 20 ciclos a 30 ciclos - para replicar duas vezes a solda e levá-las ao ensaio de cisalhamento. Essas amostras foram denominadas T2 e T3.

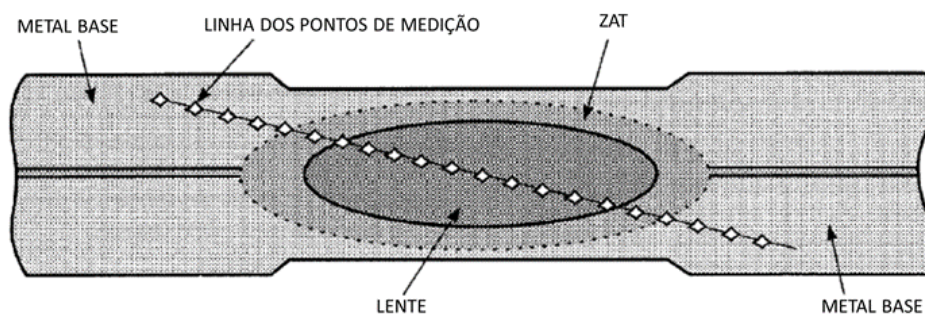
Foram escolhidas amostras para os dois extremos da faixa de potência (65% e 85%) com o intuito de verificar suas dimensões de diâmetro da lente de solda pela imagem gerada no microscópio óptico e medir os valores de microdureza da junta.

As amostras para microscopia óptica e microdureza Vickers foram preparadas por lixamento, polimento seguido de ataque químico das superfícies a serem analisadas, conforme as seguintes etapas:

- Embutimento em baquelite;
- Lixamento mecânico, com lixas d'água, de granulação 220, 320, 400, 500, 600 e 1200, com alternância da direção da amostra em 90 graus, em cada mudança de lixa;
- Polimento da amostra com panos de 6, 3 e 1  $\mu\text{m}$  e leve aplicação de alumina e lavagem da amostra com água destilada;
- Ataque com Nital a 3%.



Conforme a norma D8.7M (2005), as métricas utilizadas para o ensaio de microdureza foram determinadas dentro do padrão estabelecido. A carga constante do ensaio pode ser realizada entre 0,2 kg e 1 kg. Os pontos devem ser feitos a 0,4 mm de distância entre si ou não menos que 3 vezes a diagonal principal de qualquer ponto adjacente, como indica a Figura 13.



**Figura 13: Pontos para medição da microdureza.**  
**Fonte: AWS 8.7M, modificado.**

- A velocidade da punção foi ajustada para 200  $\mu\text{m/s}$ ;
- O tempo de aplicação da força não deve exceder 10 s;
- Ao todo foram realizados 10 pontos;

## Capítulo 4

### 4. Resultados Obtidos

O presente capítulo sumariza todos os resultados obtidos durante o projeto. Estes estão listados abaixo:

- Amostras unidas por solda por ponto;
- Gráficos de carga x alongamento obtidos pelo ensaio de cisalhamento;
- Medidas de diâmetro de lentes de solda;
- Imagens microscópicas da junta geradas pelo microscópio óptico;
- Pontos de microdureza nas amostras de 65 % e 85 %.

#### 4.1. Solda por Ponto

A Figura 14 revela o aspecto geral das soldas e as Tabelas 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11, referentes à primeira fase e expõem os resultados dos parâmetros pré-estabelecidos no item 3.3.

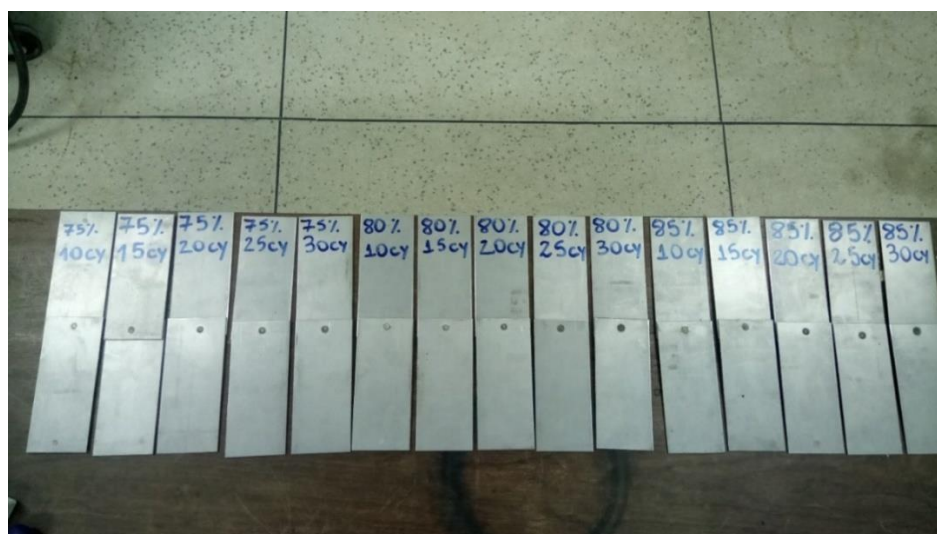


Figura 14: Corpos de prova soldados.

**Tabela 5: Resultados para a série de 60%.**

<b>Tempo de Soldagem (ciclos)</b>	<b>Voltagem RMS (V)</b>	<b>Amperagem (kA)</b>	<b>Potência RMS (kVA)</b>	<b>Voltagem Pico (V)</b>	<b>Amperagem Pico (kA)</b>	<b>Potência Pico (kVA)</b>
10	Sem Fusão	Sem Fusão	Sem Fusão	Sem Fusão	Sem Fusão	Sem Fusão
15	1,16	5,91	6,86	1,97	10,18	20,1
20	1,16	6	6,96	1,96	3	5,9
25	1,1	6,14	6,75	3	10,47	31,4
30	1,11	6,13	6,8	1,94	10,3	20

**Tabela 6: Resultados para a série de 65%.**

<b>Tempo de Soldagem (ciclos)</b>	<b>Voltagem RMS (V)</b>	<b>Amperagem (kA)</b>	<b>Potência RMS (kVA)</b>	<b>Voltagem Pico (V)</b>	<b>Amperagem Pico (kA)</b>	<b>Potência Pico (kVA)</b>
10	Sem Fusão	Sem Fusão	Sem Fusão	Sem Fusão	Sem Fusão	Sem Fusão
15	1,21	6,24	7,6	2,02	10,55	21,3
20	1,18	6,37	7,5	2,01	10,72	21,5
25	1,15	6,42	7,4	1,99	10,72	21,3
30	1,09	6,55	7,1	1,97	10,89	21,5

**Tabela 7: Resultados para a série de 70%.**

<b>Tempo de Soldagem (ciclos)</b>	<b>Voltagem RMS (V)</b>	<b>Amperagem (kA)</b>	<b>Potência RMS (kVA)</b>	<b>Voltagem Pico (V)</b>	<b>Amperagem Pico (kA)</b>	<b>Potência Pico (kVA)</b>
10	Sem Fusão	Sem Fusão	Sem Fusão	Sem Fusão	Sem Fusão	Sem Fusão
15	1,21	6,85	8,3	2,02	11,45	23,1
20	1,2	6,94	8,3	2,02	11,45	23,1
25	1,16	7,05	8,2	1,99	11,65	23,2
30	1,14	7,12	8,1	1,99	11,65	23,2

**Tabela 8: Resultados para a série de 75%.**

<b>Tempo de Soldagem (ciclos)</b>	<b>Voltagem RMS (V)</b>	<b>Amperagem (kA)</b>	<b>Potência RMS (kVA)</b>	<b>Voltagem Pico (V)</b>	<b>Amperagem Pico (kA)</b>	<b>Potência Pico (kVA)</b>
10	1,27	7,01	8,9	2,11	11,67	24,6
15	1,28	7,12	9,1	2,11	11,72	24,7
20	1,25	7,24	9,1	2,11	11,77	24,8
25	1,21	7,35	8,9	2,14	11,94	25,6
30	1,18	7,46	8,8	2,1	12,08	25,4

**Tabela 9: Resultados para a série de 80%.**

<b>Tempo de Soldagem (ciclos)</b>	<b>Voltagem RMS (V)</b>	<b>Amperagem (kA)</b>	<b>Potência RMS (kVA)</b>	<b>Voltagem Pico (V)</b>	<b>Amperagem Pico (kA)</b>	<b>Potência Pico (kVA)</b>
10	1,33	7,4	9,8	2,19	12,33	27,0
15	1,33	7,52	10,0	2,2	12,23	26,9
20	1,28	7,57	9,8	2,17	12,33	26,8
25	1,24	7,78	9,6	2,15	12,4	26,7
30	1,2	7,88	9,5	2,17	12,6	27,3

**Tabela 10: Resultados para a série de 85%.**

<b>Tempo de Soldagem (ciclos)</b>	<b>Voltagem RMS (V)</b>	<b>Amperagem (kA)</b>	<b>Potência RMS (kVA)</b>	<b>Voltagem Pico (V)</b>	<b>Amperagem Pico (kA)</b>	<b>Potência Pico (kVA)</b>
10	1,35	7,78	10,5	2,21	12,72	28,1
15	1,34	7,91	10,6	2,23	12,7	28,3
20	1,3	8,06	10,5	2,18	12,74	27,8
25	1,24	8,24	10,2	2,32	13,75	31,9
30	1,23	8,38	10,3	2,23	13,31	29,7

Tabela 11: Resultados para a série de 90%.

Tempo de Soldagem (ciclos)	Voltagem RMS (V)	Amperagem (kA)	Potência RMS (kVA)	Voltagem Pico (V)	Amperagem Pico (kA)	Potência Pico (kVA)
10	1,38	8,19	11,3	2,23	13,21	29,5
15	1,33	8,43	11,2	2,23	13,92	31,0
20	1,24	8,68	10,8	2,17	14,19	30,8
25	1,16	8,89	10,3	2,14	14,21	30,4
30	1,12	9,06	10,1	2,24	14,26	31,9

Os resultados indicados nas Tabelas 12, 13 e 14 são referentes à segunda fase da etapa de soldagem.

Tabela 12: Resultados para a série de 20 cy da segunda fase.

PARÂMETRO 20cy - 65%, 70%, 75%, 80% e 85%						
Potências	Voltagem RMS (V)	Amperagem (kA) RMS	Potência RMS (kVA)	Voltagem (pico)	Amperagem kA(pico)	Potência (pico) kVA
65%	1,33	6,08	8,1	2,35	10,3	24,2
	1,31	6,04	7,9	2,33	10	23,3
70%	1,34	6,47	8,7	2,46	10,86	26,7
	1,33	6,46	8,6	2,3	10,77	24,8
75%	1,37	6,91	9,5	2,37	11,38	27,0
	1,31	7,07	9,3	2,39	11,84	28,3
80%	1,39	7,377	10,3	2,46	12,16	29,9
	1,34	7,52	10,1	2,51	12,5	31,4
85%	1,36	7,93	10,8	2,6	13,26	34,5
	1,36	7,98	10,9	2,63	13,06	34,3

Tabela 13: Resultados para a série de 25 cy da segunda fase.

PARÂMETRO 25cy - 65%, 70%, 75%, 80% e 85%						
Potências	Voltagem RMS (V)	Amperagem (kA) RMS	Potência RMS (kVA)	Voltagem (pico)	Amperagem kA(pico)	Potência (pico) kVA
65%	1,28	6,17	7,9	2,37	10,62	25,2
	1,27	6,22	7,9	2,3	10,67	24,5
70%	1,3	6,7	8,7	2,44	11,37	27,7
	1,31	6,66	8,7	2,46	11,3	27,8
75%	1,28	7,25	9,3	2,54	12,08	30,7
	1,28	7,24	9,3	2,56	12,06	30,9
80%	1,29	7,73	10,0	2,59	12,92	33,5
	1,28	7,72	9,9	2,59	12,7	32,9
85%	1,31	8,14	10,7	2,66	13,31	35,4
	1,28	8,2	10,5	2,62	13,33	34,9

Tabela 14: Resultados para a série de 30 cy da segunda fase.

PARÂMETRO 30cy - 65%, 70%, 75%, 80% e 85%						
Potências	Voltagem RMS (V)	Amperagem (kA) RMS	Potência RMS (kVA)	Voltagem (pico)	Amperagem kA(pico)	Potência (pico) kVA
65%	1,21	6,36	7,7	2,21	10,77	23,8
	1,24	6,32	7,8	2,32	10,72	24,9
70%	1,25	6,83	8,5	2,26	11,38	25,7
	1,27	6,82	8,7	2,26	11,4	25,8
75%	1,24	7,39	9,2	2,29	12,08	27,7
	1,29	7,25	9,4	2,33	11,99	27,9
80%	1,25	7,88	9,9	2,36	12,79	30,2
	1,28	7,8	10,0	2,41	12,57	30,3
85%	1,28	8,3	10,6	2,47	13,43	33,2
	1,28	8,28	10,6	2,46	13,16	32,4

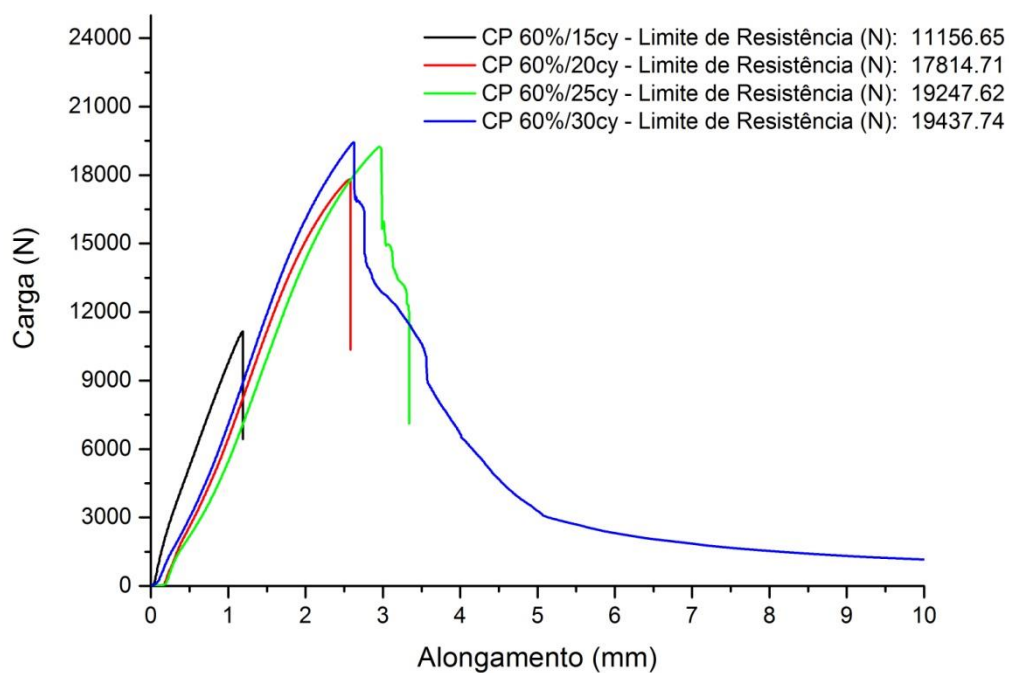
## 4.2. Ensaio de Cisalhamento

### 4.2.1. Primeira Fase de Ensaios

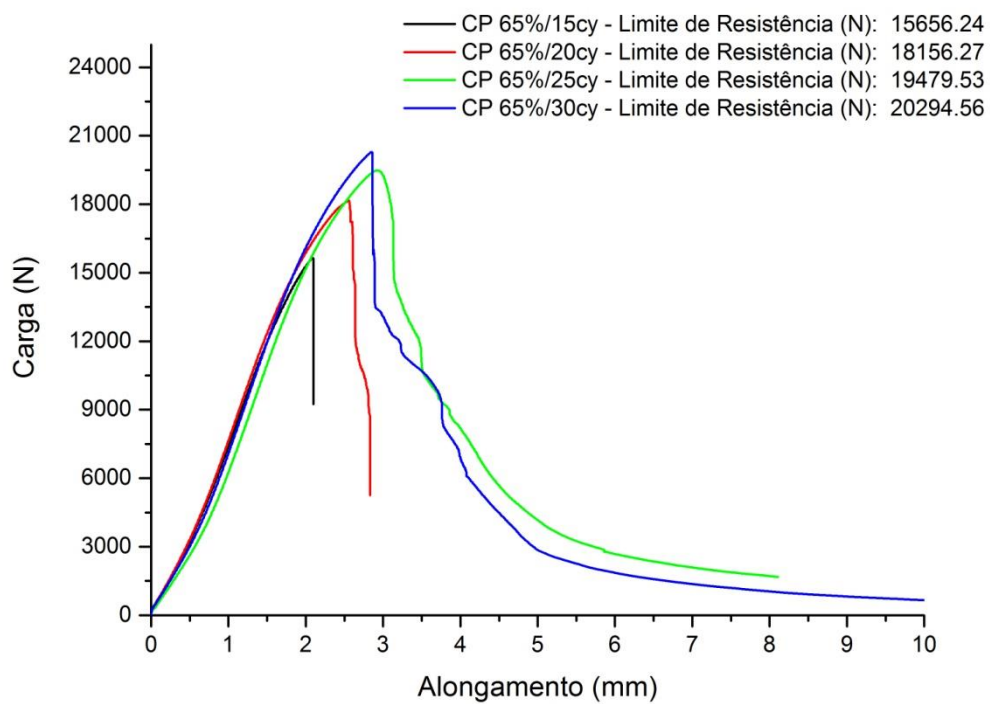
A Figura 15 indica como eram posicionados os corpos de prova no ensaio de cisalhamento e as Figuras 16, 17, 18, 19, 20, 21 e 22 exibem os gráficos gerados a partir dos ensaios para os conjuntos de corpos de prova de 60 %, 65 %, 70 %, 75 %, 80 %, 85 % e 90 %, todas relativas à primeira fase de testes, respectivamente.



**Figura 15: Momento de rompimento no ensaio de cisalhamento.**

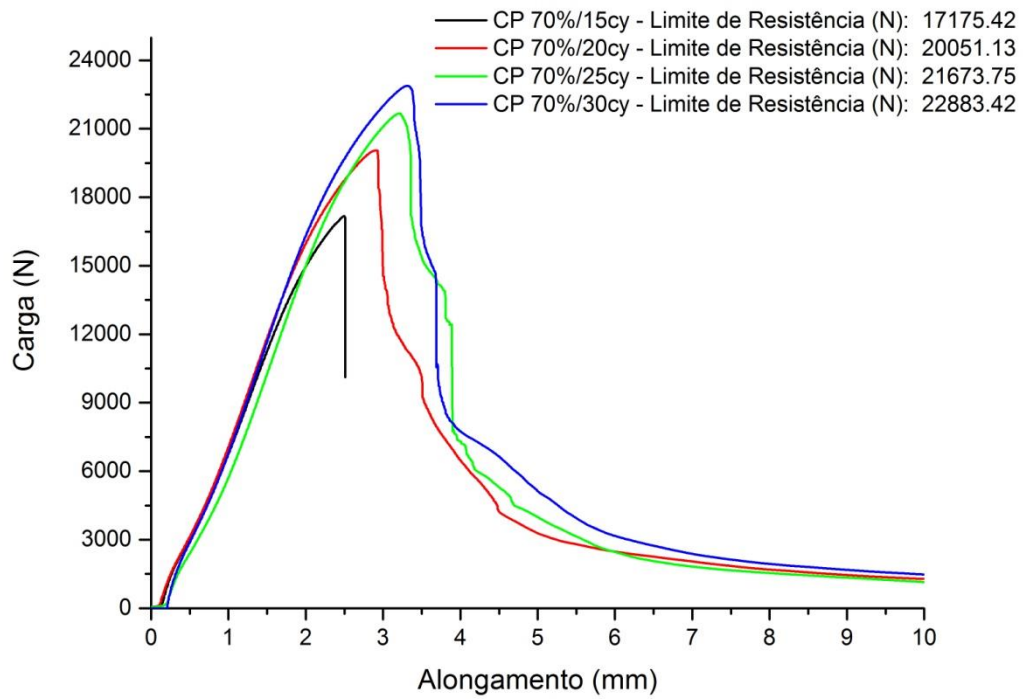


**Figura 16: Gráfico Carga x Alongamento do CP60.**

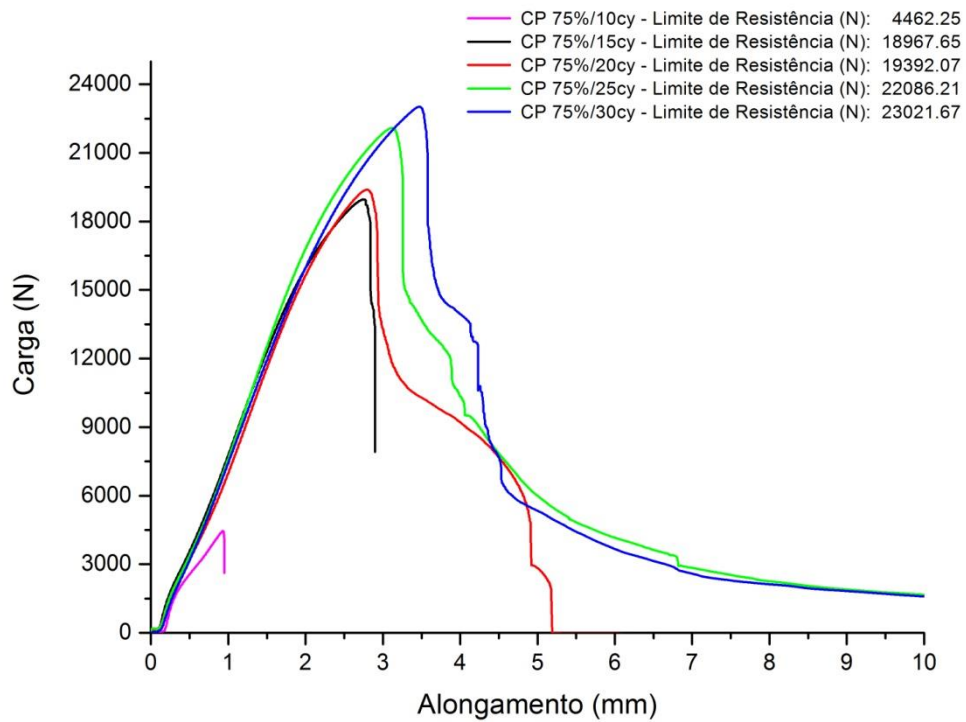


**Figura 17: Gráfico Carga x Alongamento do CP65.**





**Figura 18: Gráfico Carga x Alongamento do CP70.**



**Figura 19: Gráfico Carga x Alongamento do CP75.**

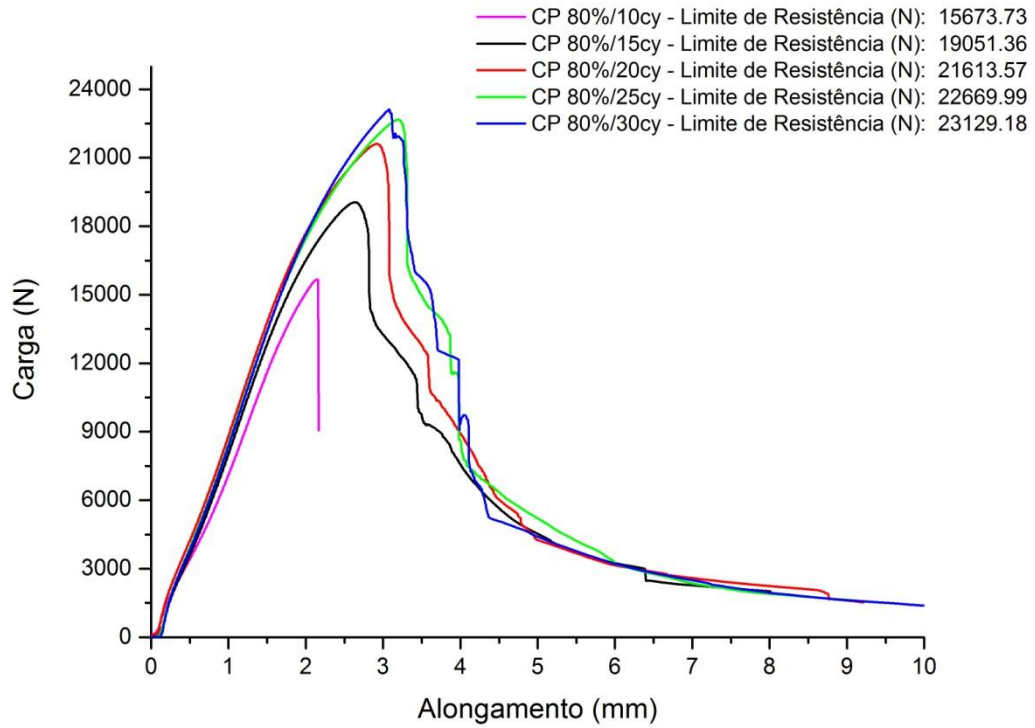


Figura 20: Gráfico Carga x Alongamento do CP80.

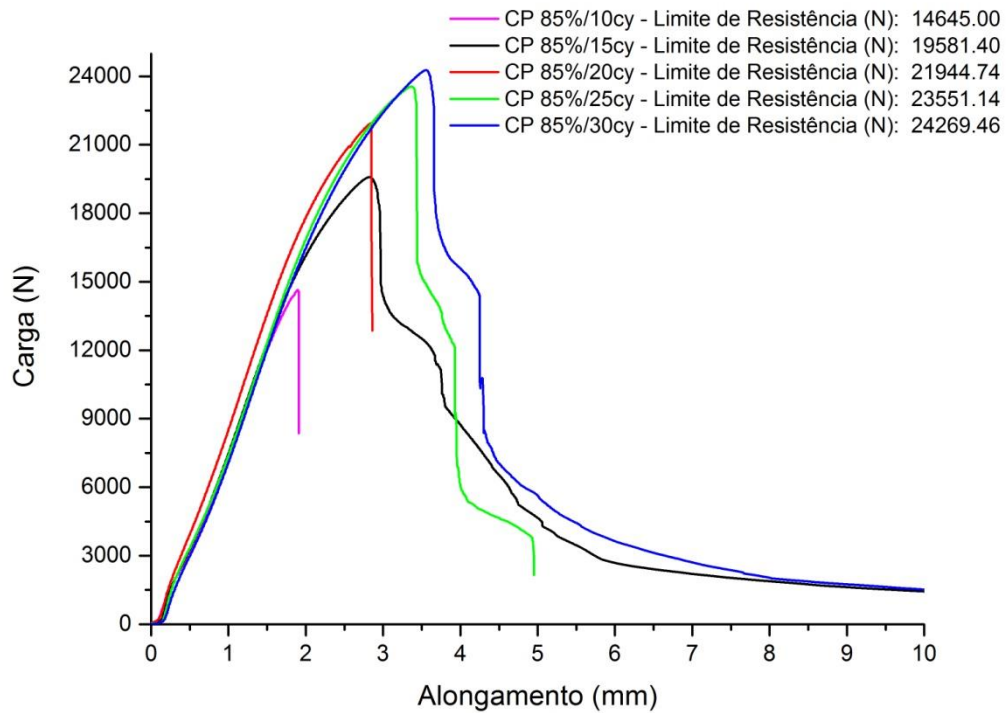
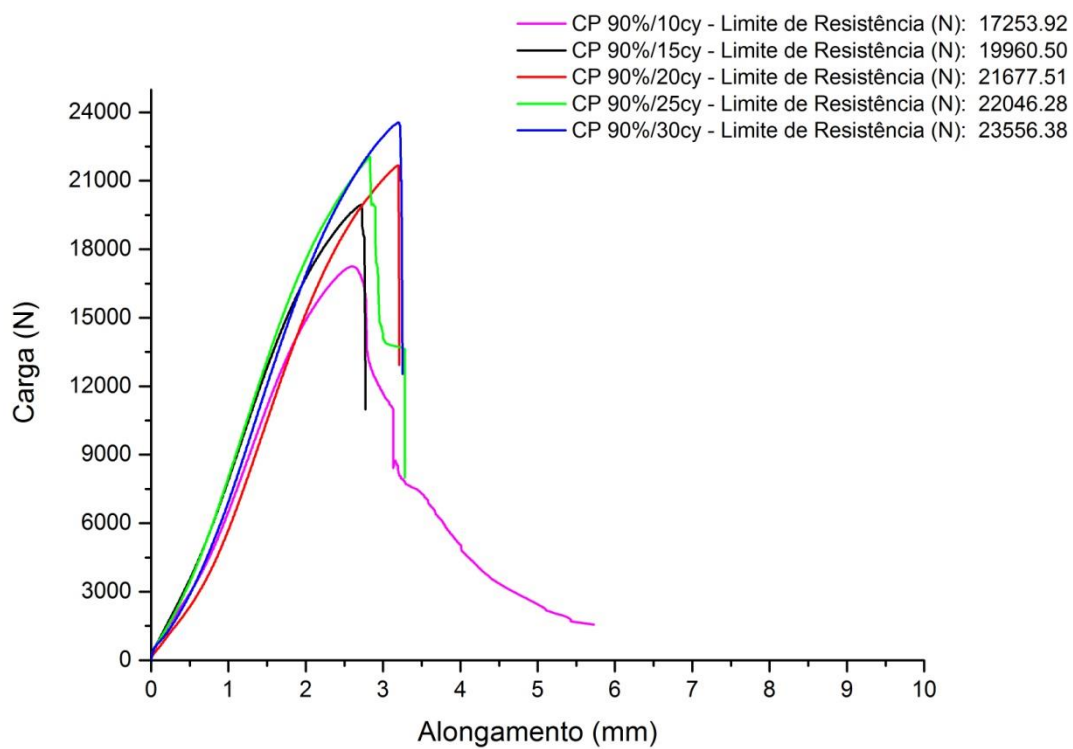
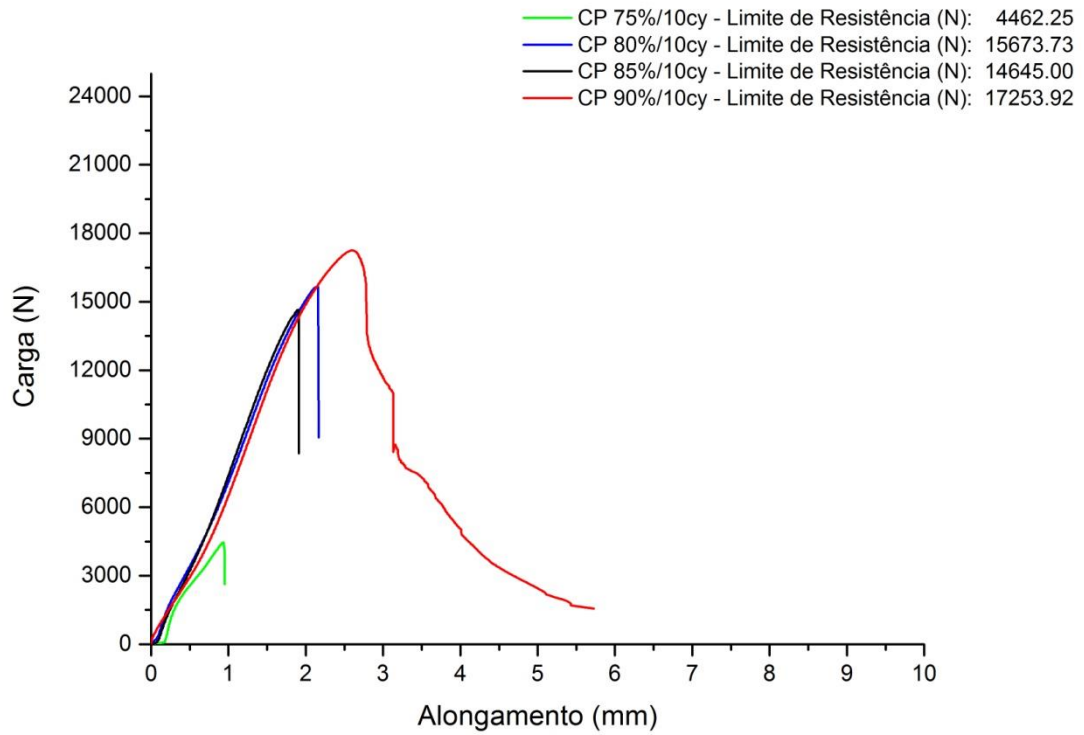


Figura 21: Gráfico Carga x Alongamento do CP85.

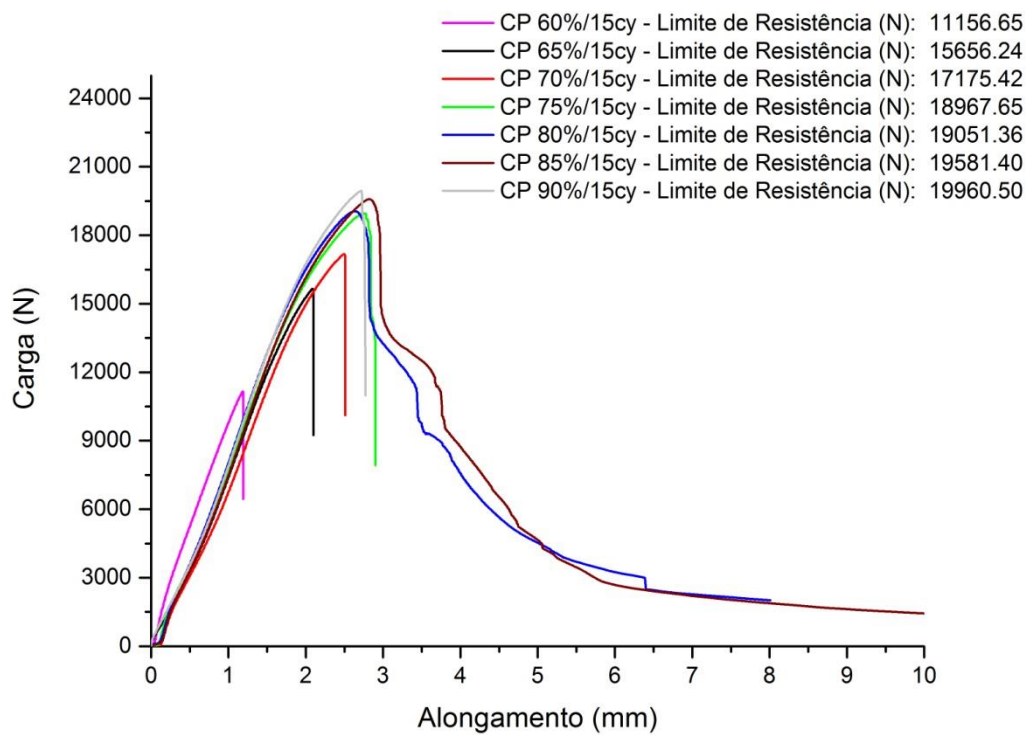


**Figura 22: Gráfico Carga x Alongamento do CP90.**

As Figuras 23, 24, 25, 26 e 27 mostram os gráficos para os ensaios dos corpos de prova da série de 10 cy, 15 cy, 20 cy, 25 cy e 30 cy, respectivamente.



**Figura 23: Gráfico Carga x Alongamento do CP 10cy.**  
**Fonte: Autora**



**Figura 24: Gráfico Carga x Alongamento do CP 15cy.**

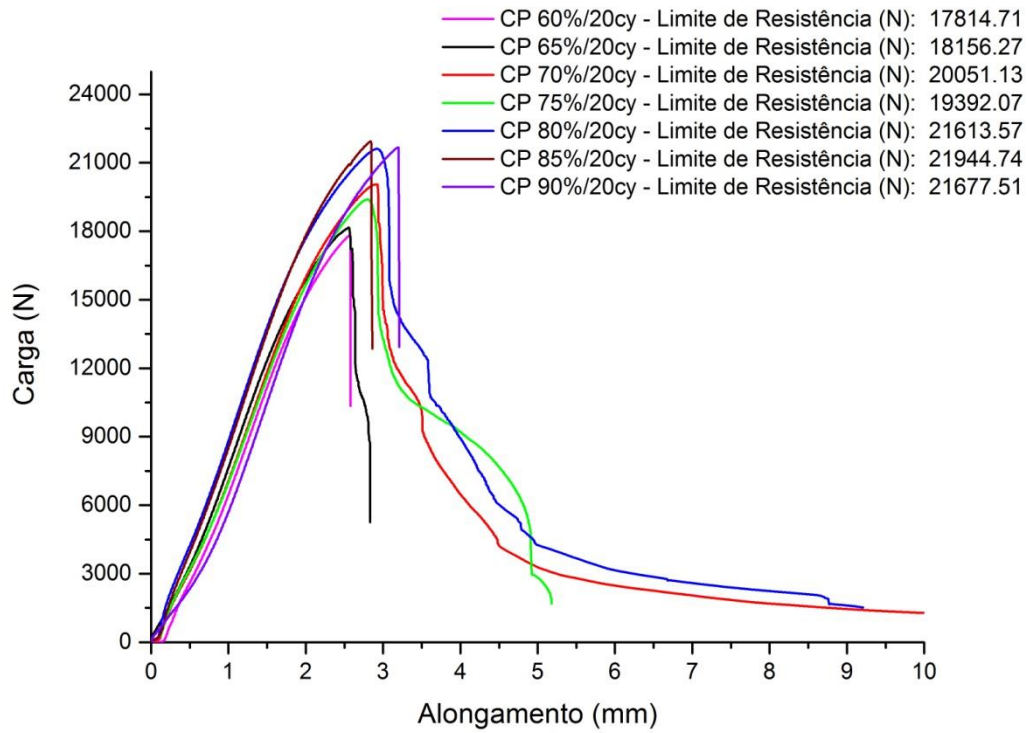


Figura 25: Gráfico Carga x Alongamento do CP 20cy.

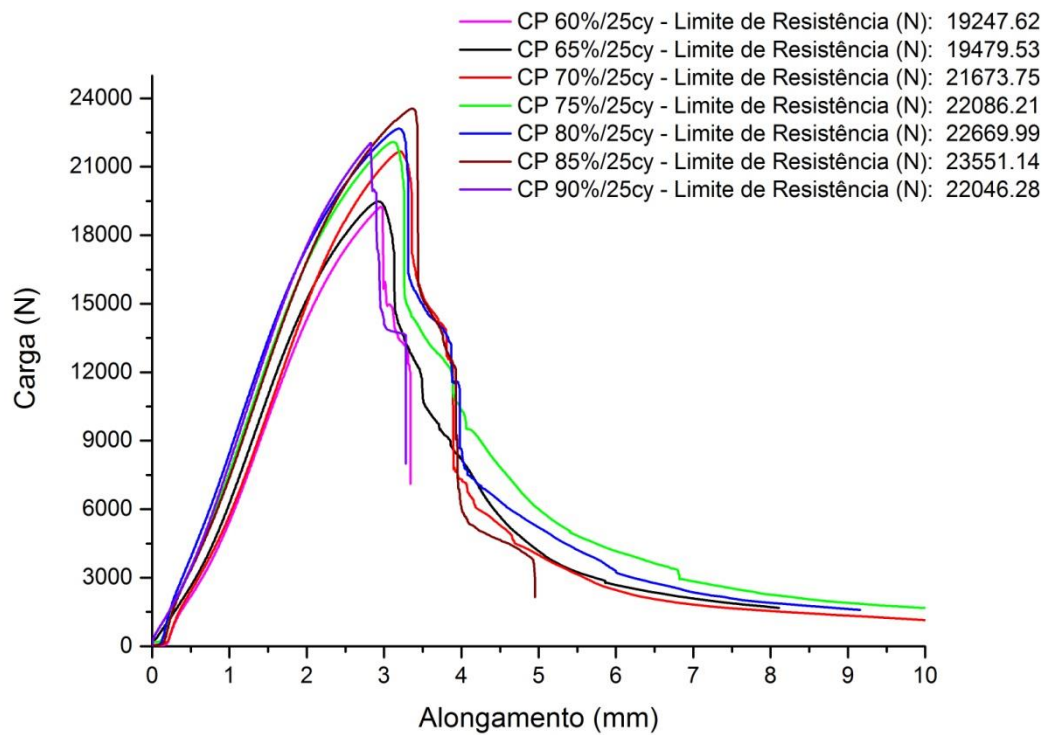


Figura 26: Gráfico Carga x Alongamento do CP 25cy.

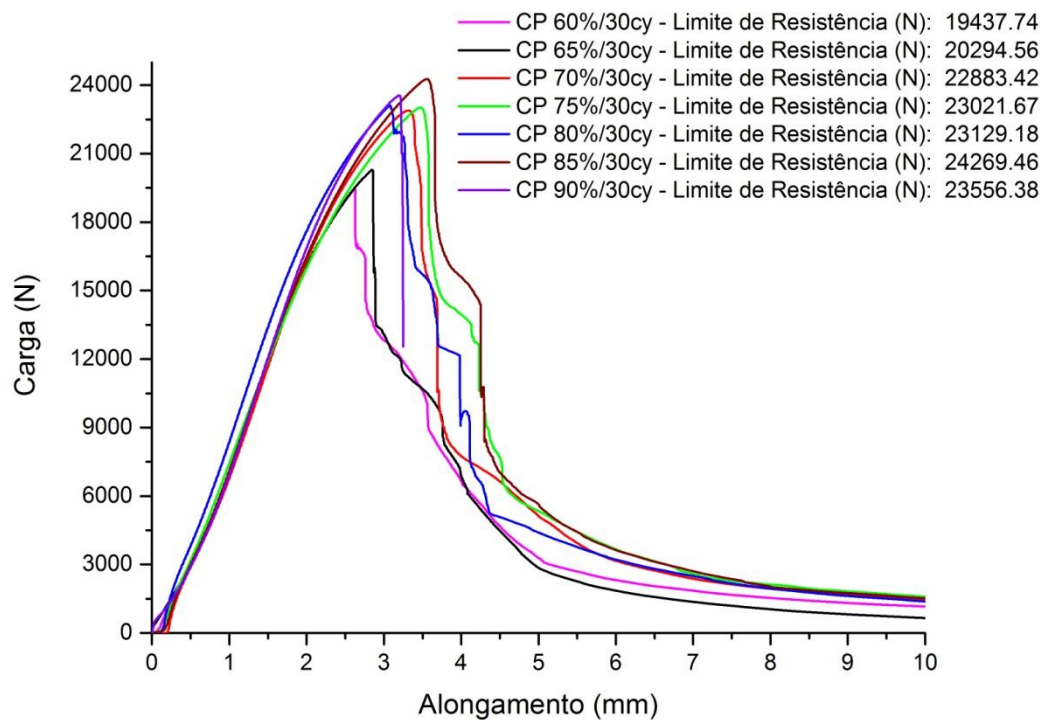
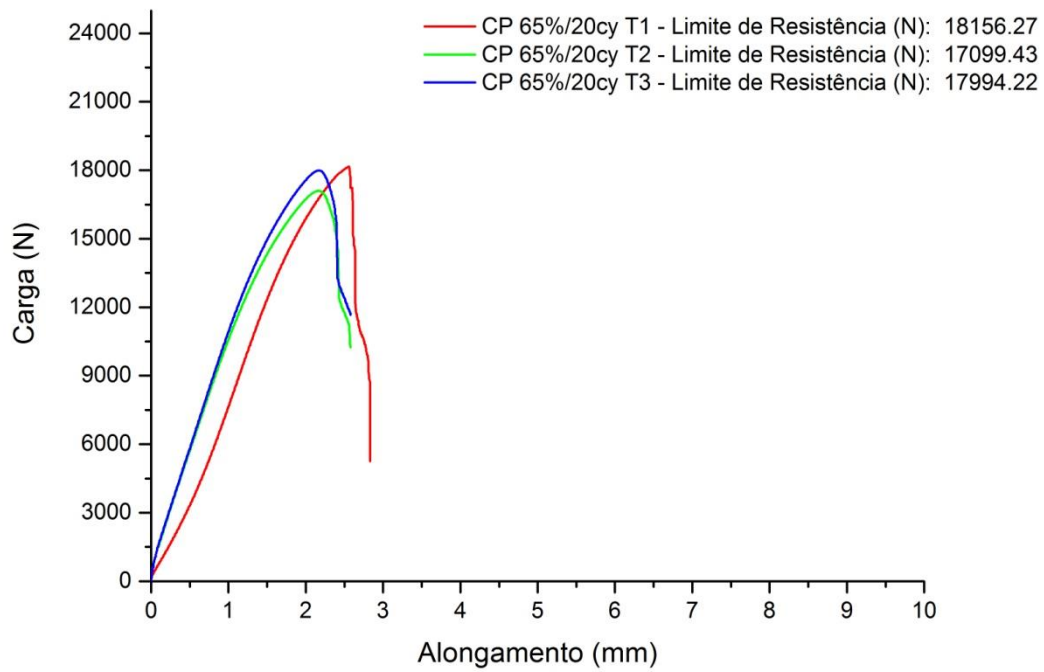


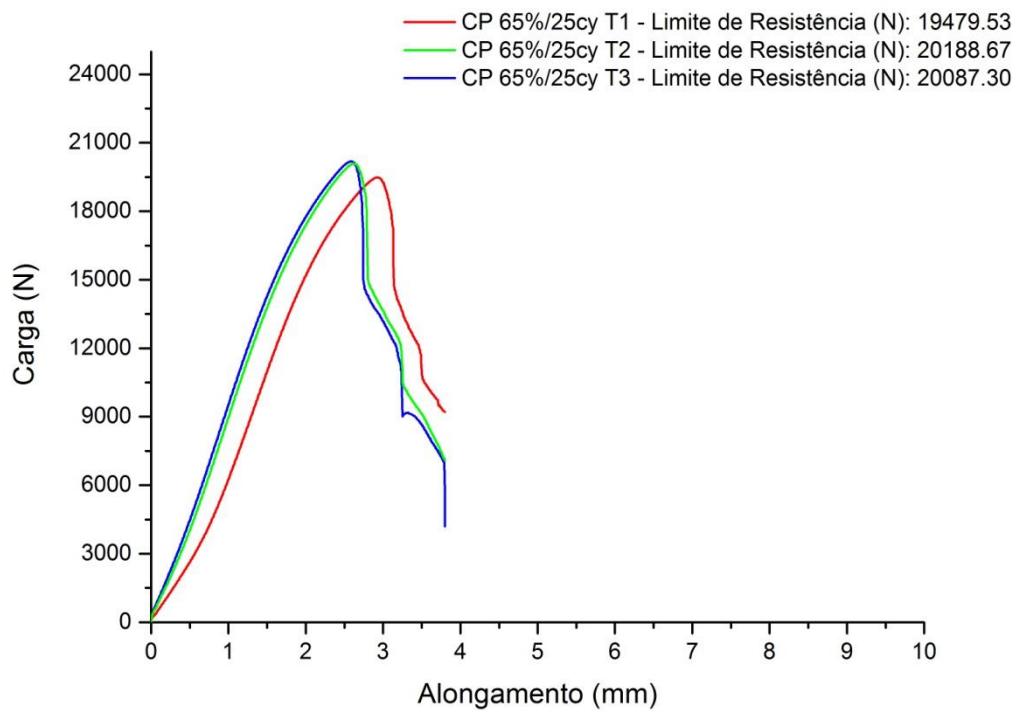
Figura 27: Gráfico Carga x Alongamento do CP 30cy.

#### 4.2.2. Segunda Fase de Ensaio

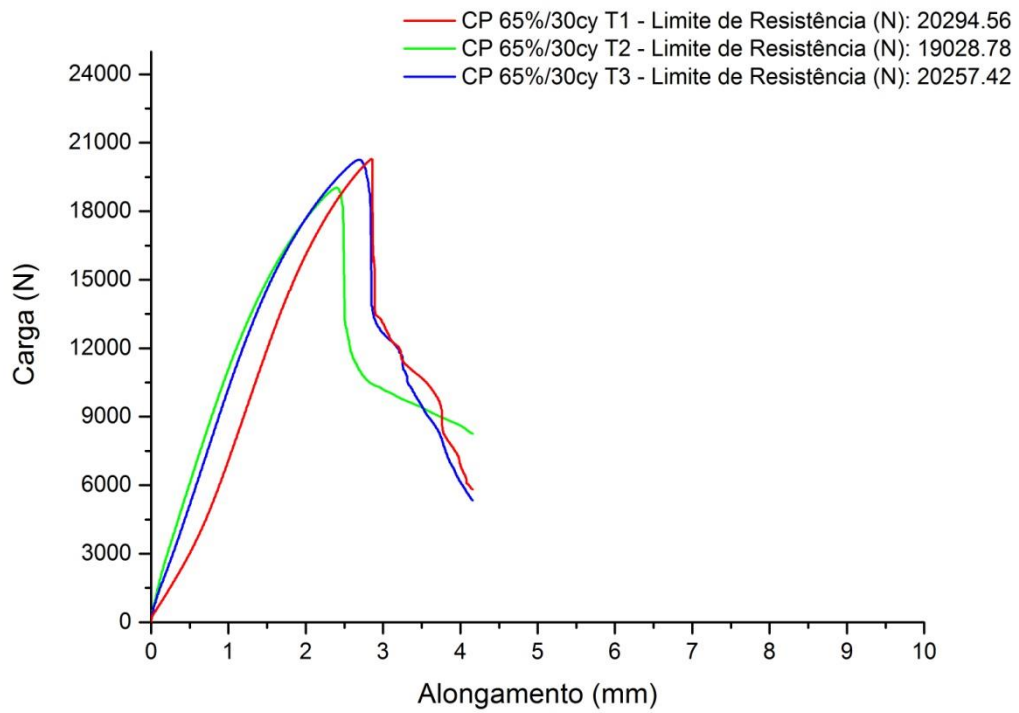
Foram conduzidas duas baterias adicionais de ensaios de cisalhamento para os corpos de prova de 65 % a 85% variando o tempo de soldagem entre 20 cy, 25 cy e 30 cy para cada uma. No total foram analisadas 30 novas amostras e gerados 15 gráficos que comparam os resultados da primeira bateria, com as curvas da segunda bateria. Esses gráficos são apresentados nas Figuras 28 a 42.



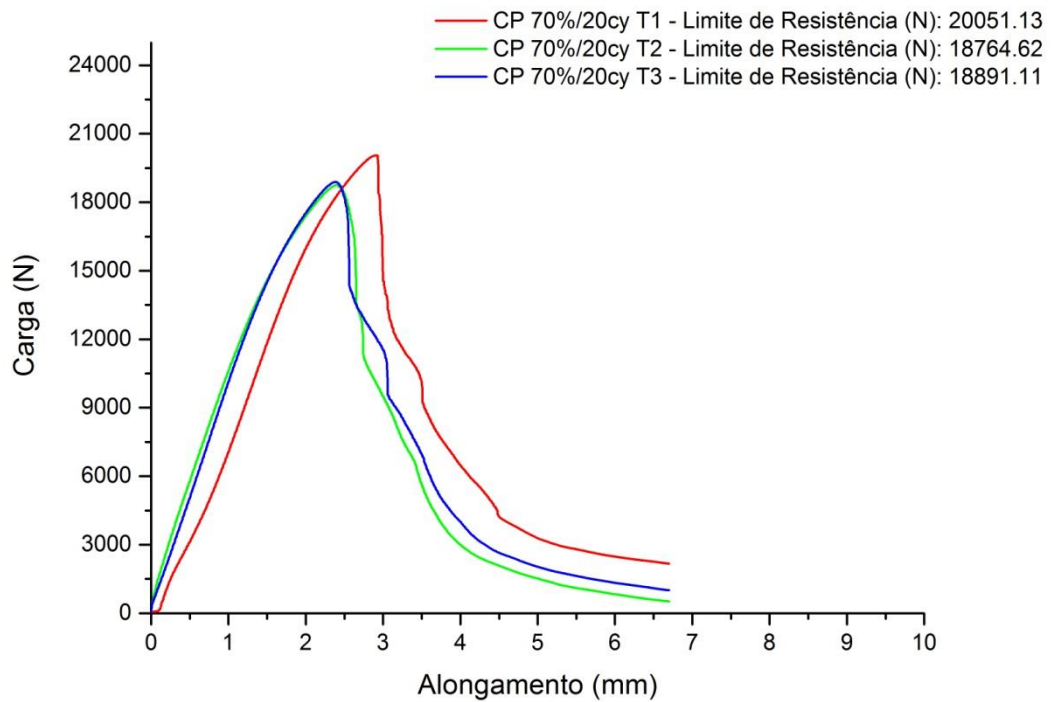
**Figura 28: Gráfico Carga x Alongamento do CP 65% 20 cy T1, T2 e T3.**



**Figura 29: Gráfico Carga x Alongamento do CP 65% 35 cy T1, T2 e T3.**

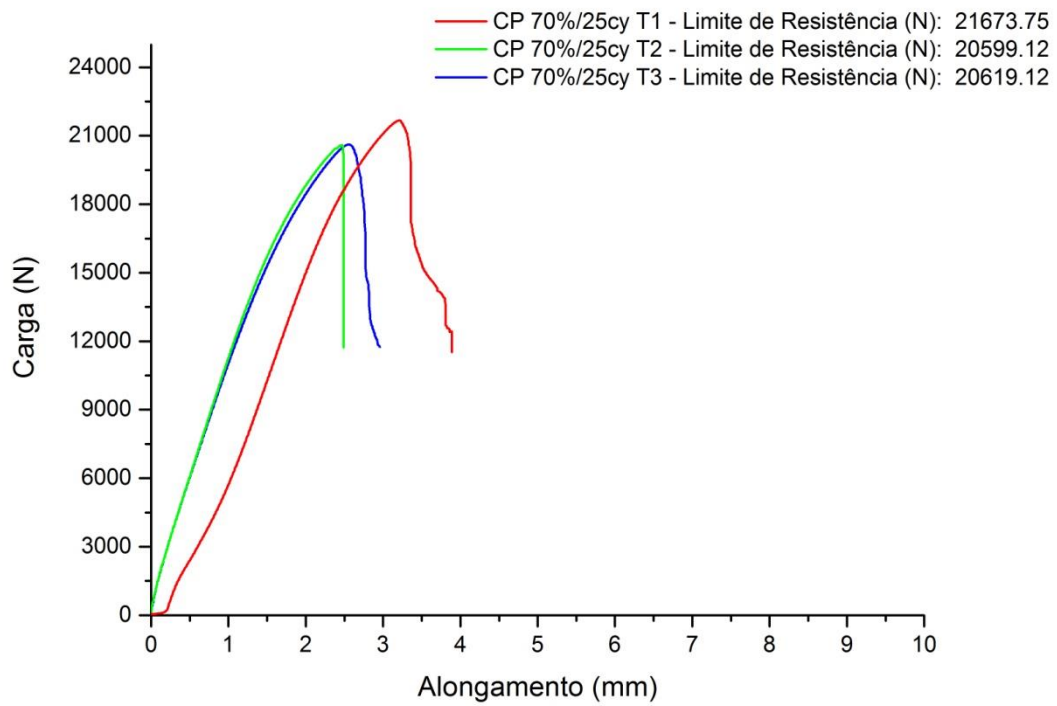


**Figura 30: Gráfico Carga x Alongamento do CP 65% 30 cy T1, T2 e T3.**

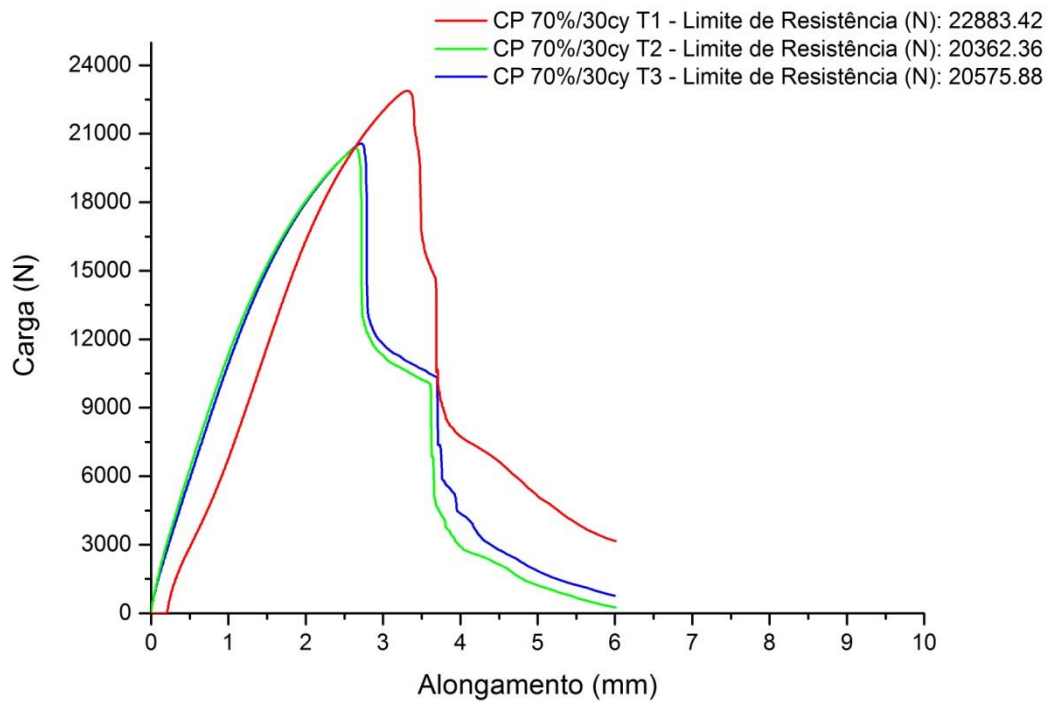


**Figura 31: Gráfico Carga x Alongamento do CP 70% 20 cy T1, T2 e T3.**

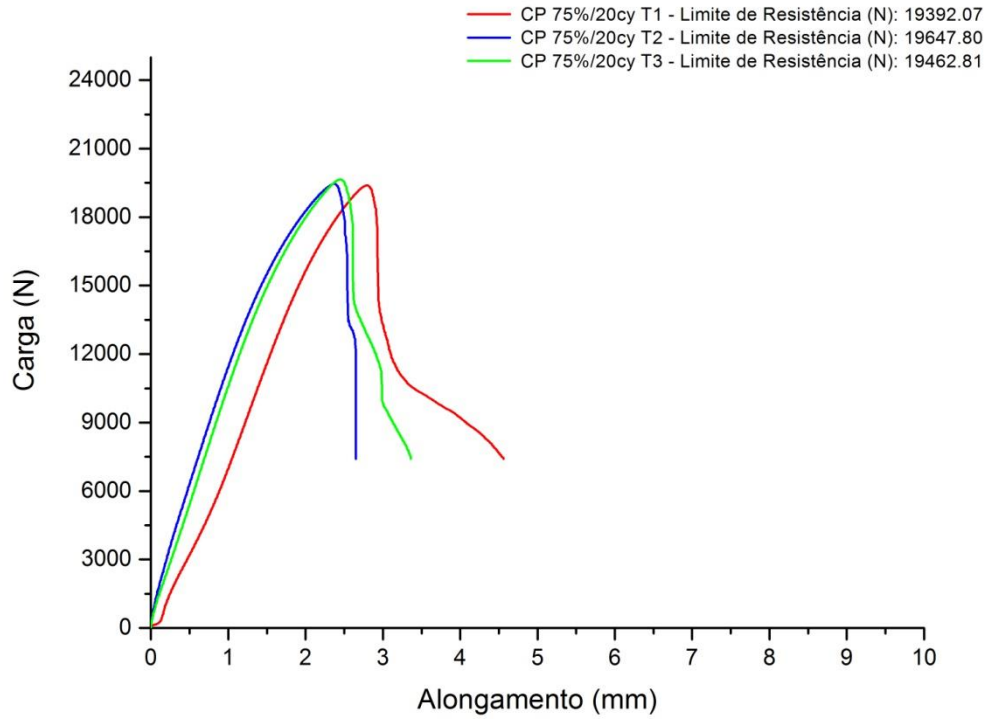




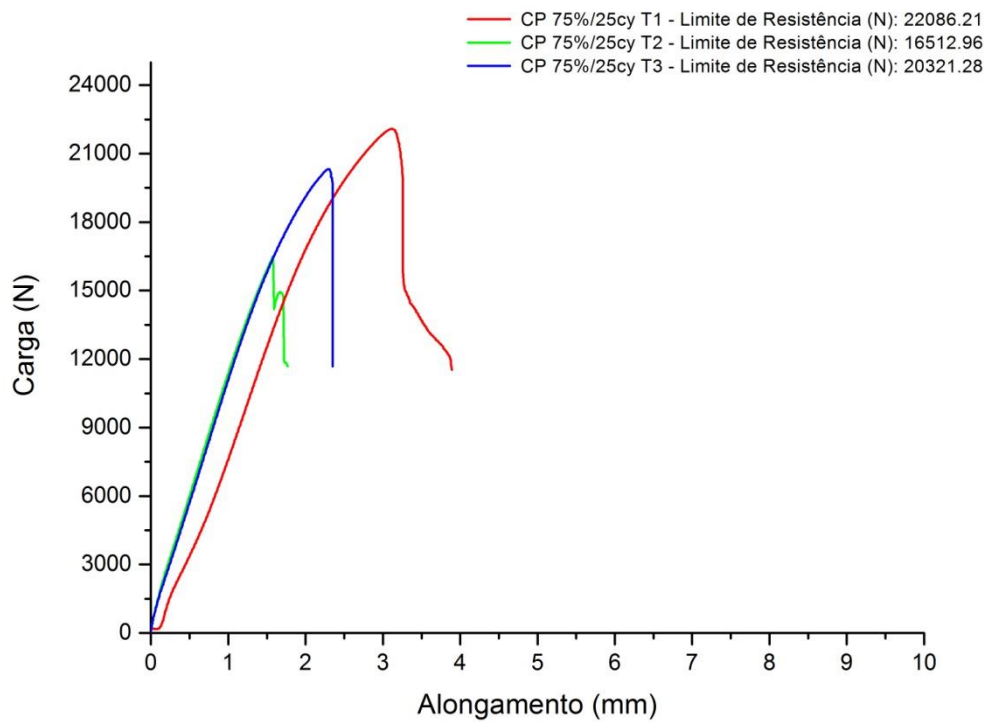
**Figura 32: Gráfico Carga x Alongamento do CP 70% 25 cy T1, T2 e T3.**



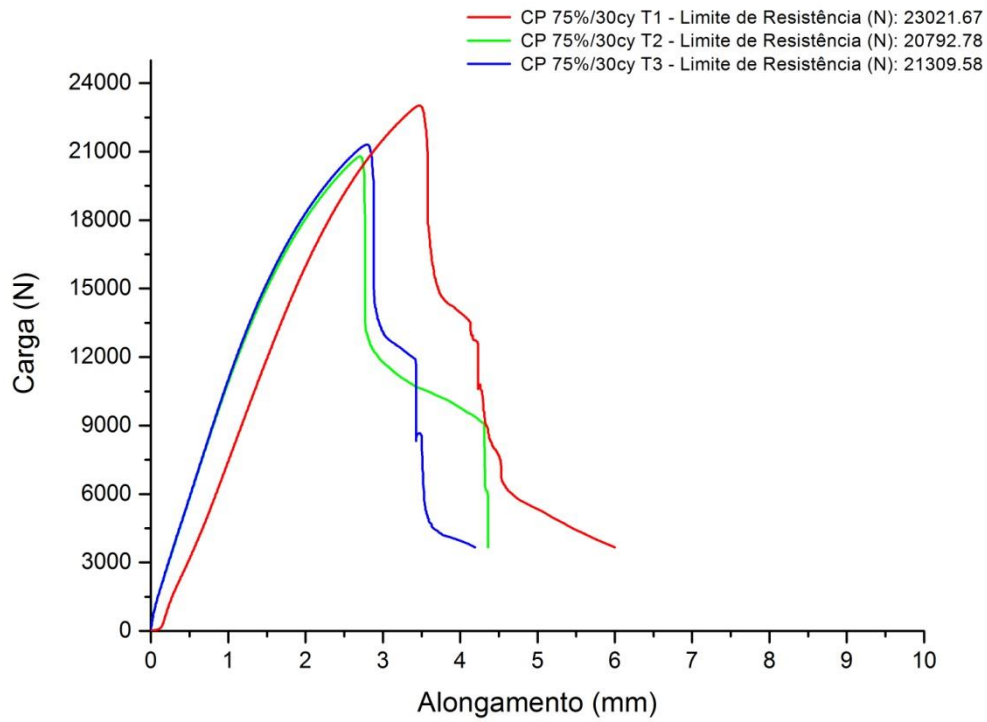
**Figura 33: Gráfico Carga x Alongamento do CP 70% 30 cy T1, T2 e T3.**



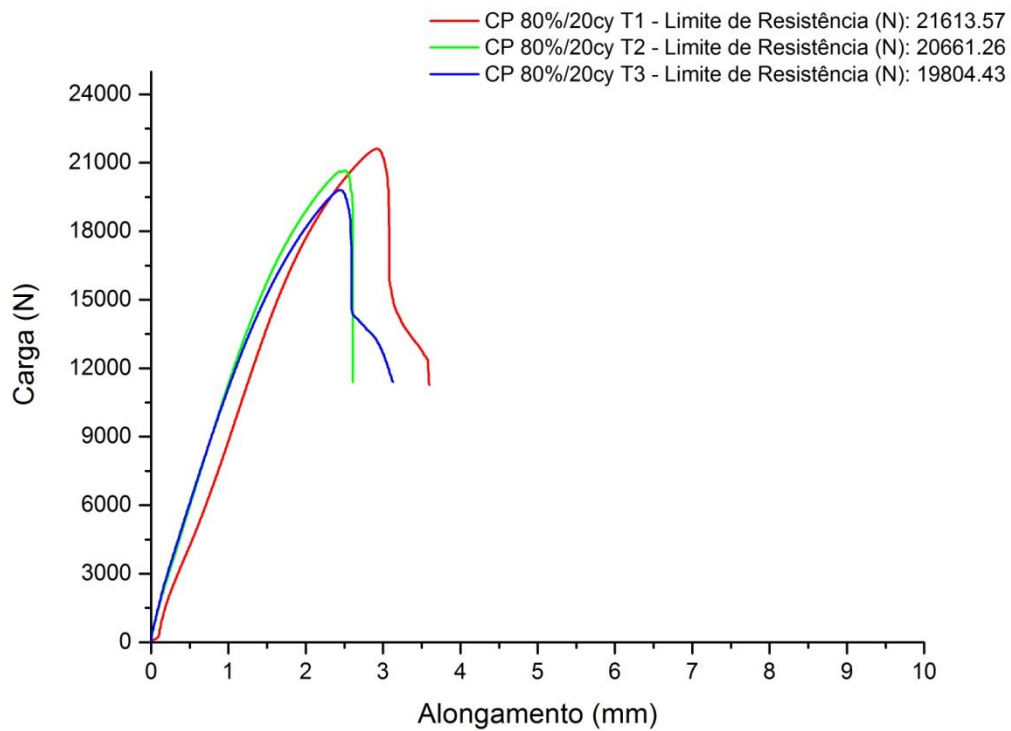
**Figura 34: Gráfico Carga x Alongamento do CP 75% 20 cy T1, T2 e T3.**



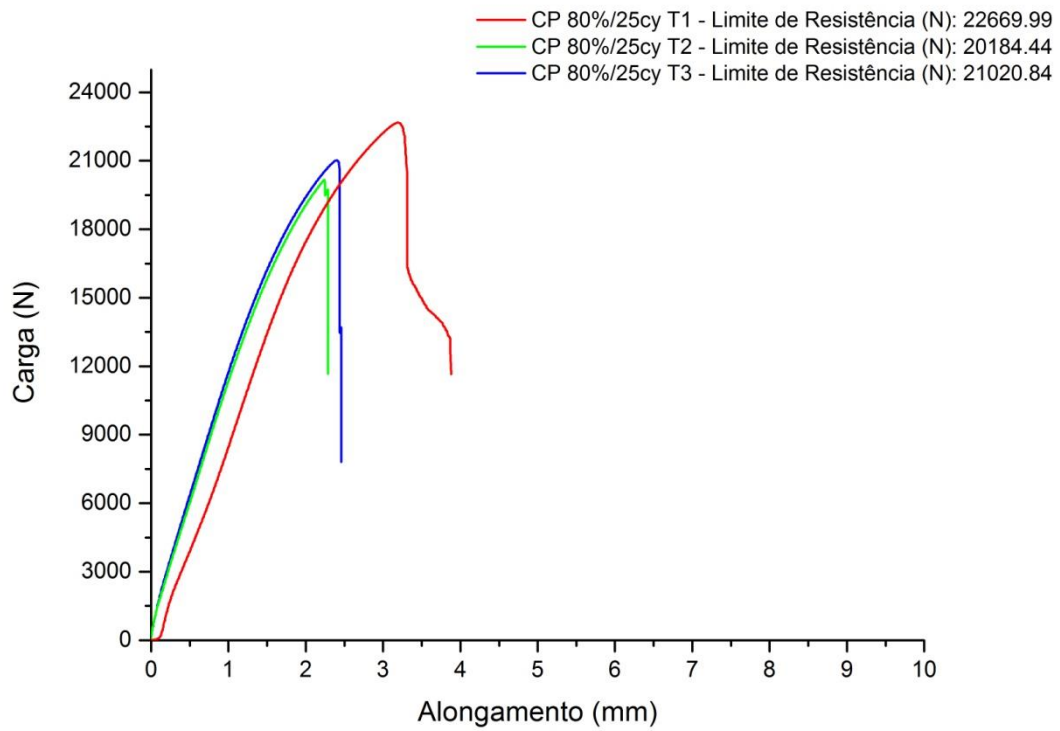
**Figura 35: Gráfico Carga x Alongamento do CP 75% 25 cy T1, T2 e T3.**



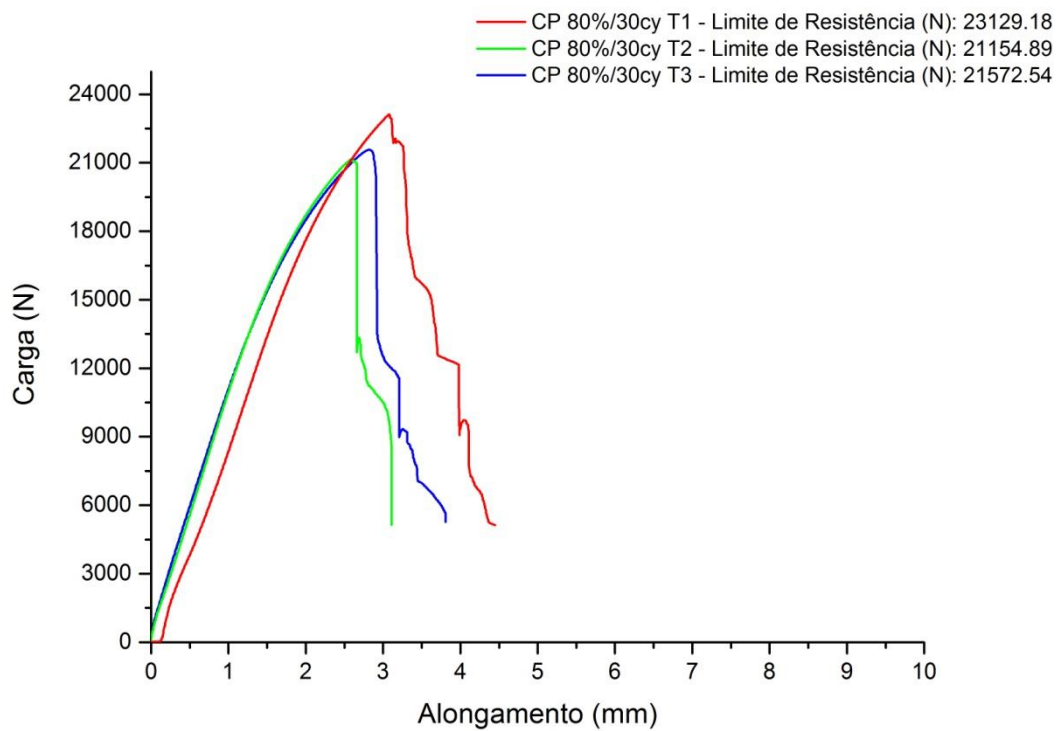
**Figura 36: Gráfico Carga x Alongamento do CP 75% 30 cy T1, T2 e T3.**



**Figura 37: Gráfico Carga x Alongamento do CP 80% 20 cy T1, T2 e T3.**



**Figura 38: Gráfico Carga x Alongamento do CP 80% 25 cy T1, T2 e T3.**



**Figura 39: Gráfico Carga x Alongamento do CP 80% 30 cy T1, T2 e T3.**

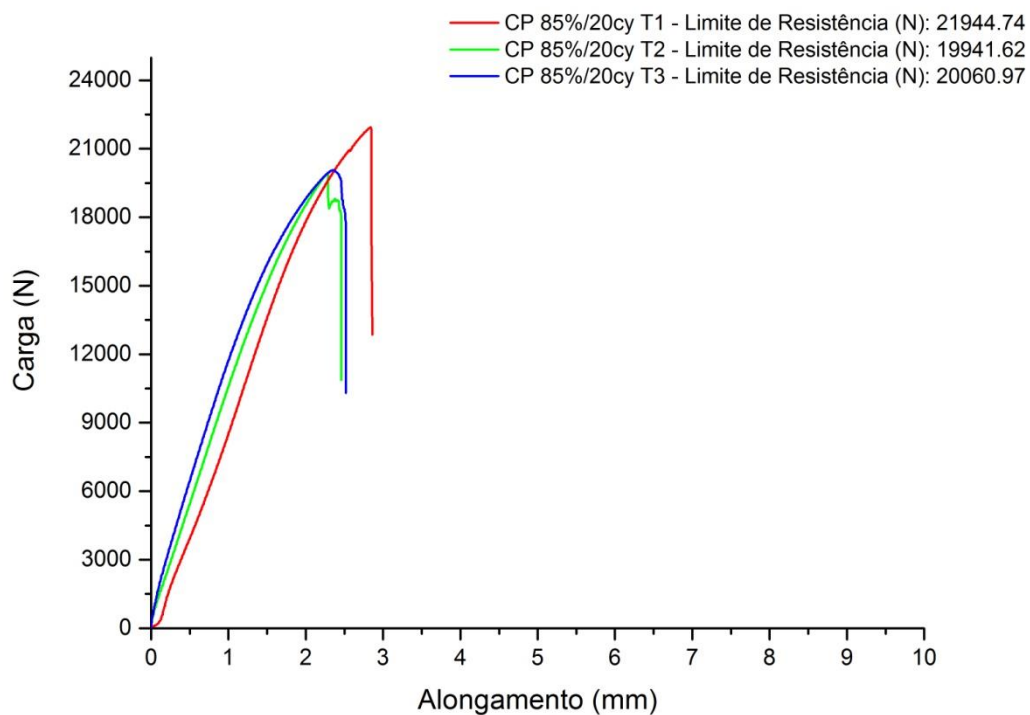


Figura 40: Gráfico Carga x Alongamento do CP 85% 20 cy T1, T2 e T3.

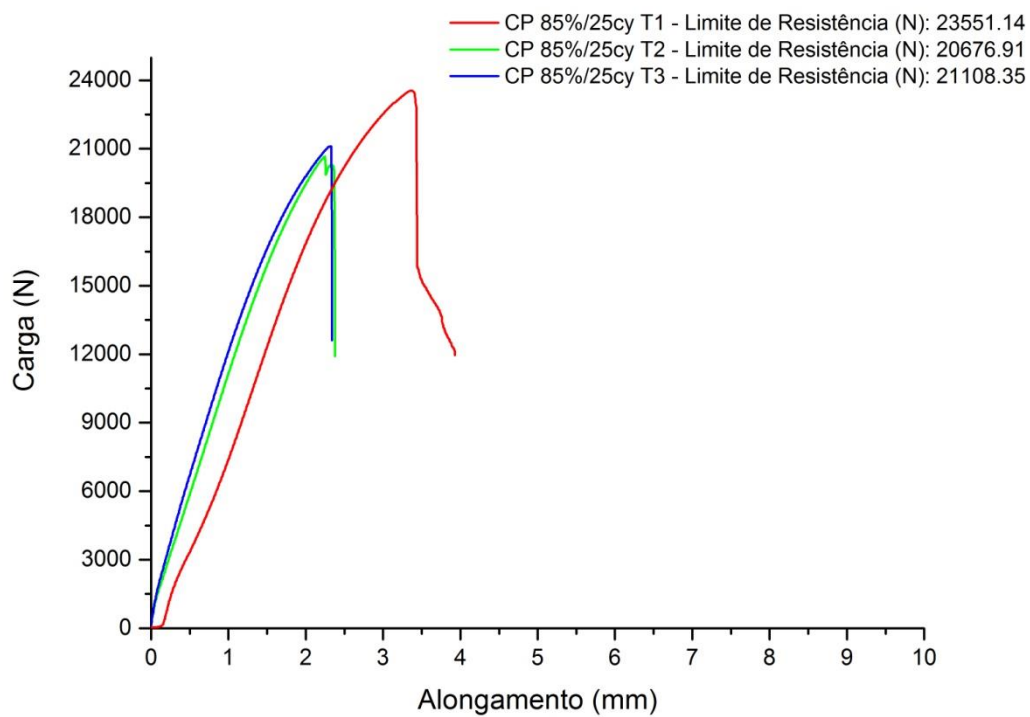


Figura 41: Gráfico Carga x Alongamento do CP 85% 25 cy T1, T2 e T3.

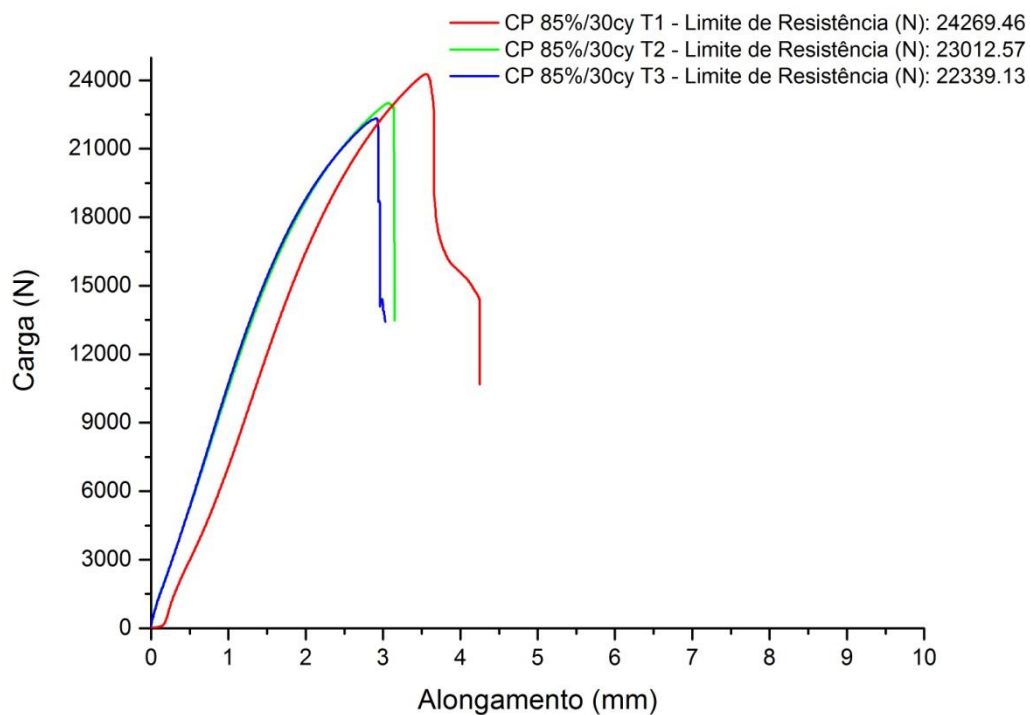


Figura 42: Gráfico Carga x Alongamento do CP 85% 30 cy T1, T2 e T3.

### 4.3. Medição das Lentes de Solda

Os resultados das medições das lentes de solda estão detalhados na Tabela 15, 16 e 17 com as medições dos diâmetros dos corpos de prova T1, T2 e T3, respectivamente. O processo de medição está exposto nas Figuras 43 a 47, sendo  $D_1$  = Diâmetro Máximo e  $D_2$  = Diâmetro Mínimo.

Tabela 15: Medições dos diâmetros das lentes de soldas.

Diâmetro das Lentes de Solda T1 [mm]														
Tempo de Soldagem [ciclos]	60%		65%		70%		75%		80%		85%		90%	
	$D_1$	$D_2$	$D_1$	$D_2$	$D_1$	$D_2$	$D_1$	$D_2$	$D_1$	$D_2$	$D_1$	$D_2$	$D_1$	$D_2$
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.10	4.10
15	-	-	-	-	-	-	-	-	5.65	5.55	5.60	5.40	4.60	3.80
20	-	-	2.70	1.90	4.30	5.60	8.30	10.60	7.00	6.35	7.20	6.90	4.45	4.80
25	-	-	8.05	8.15	3.75	6.20	5.70	8.50	4.40	4.40	5.00	4.90	4.65	4.55
30	4.65	5.80	4.90	5.65	4.80	4.90	5.25	7.25	5.35	5.90	6.10	6.25	4.40	5.00

**Tabela 16: Medições dos diâmetros das lentes de soldas.**

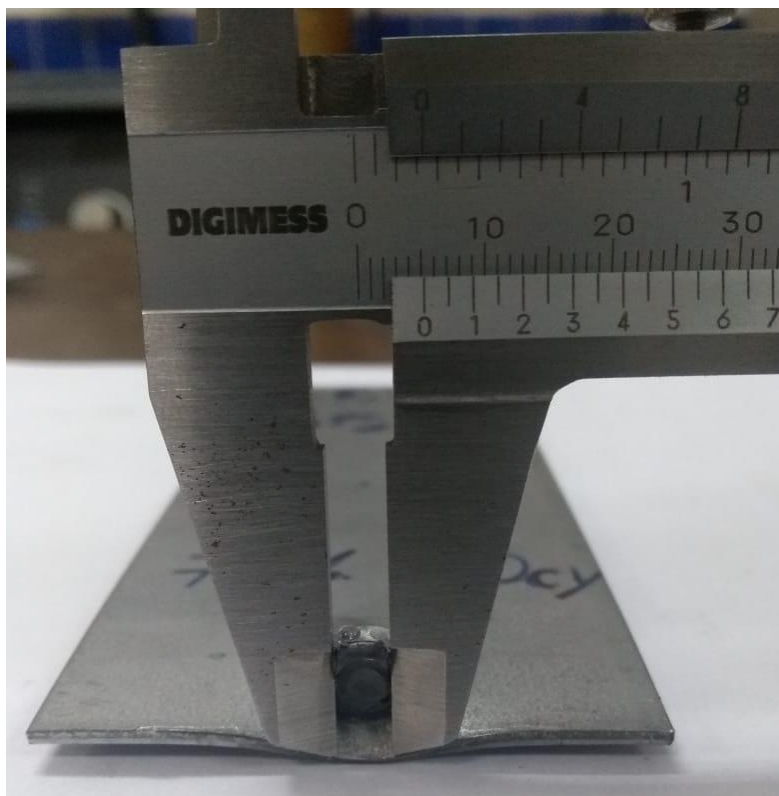
Diâmetro das Lentes de Solda T2 [mm]										
	65%		70%		75%		80%		85%	
Tempo de Soldagem [ciclos]	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>
20	7.5	8.0	8.4	8.8	8.1	8.9	8.9	10.0	4.9	3.6
25	8.0	6.8	-	-	4.7	5,7	6.8	6.1	-	-
30	10.1	11.7	7,2	4.5	4,7	7.9	4,3	4,7	4.3	3.8

**Tabela 17: Medições dos diâmetros das lentes de soldas.**

Diâmetro das Lentes de Solda T3 [mm]										
	65%		70%		75%		80%		85%	
Tempo de Soldagem [ciclos]	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>
20	7.7	9.3	8.0	9.0	-	-	-	-	-	-
25	8.4	7.6	9.3	6.35	-	-	-	-	5.2	5.1
30	7.4	10.8	4.8	7.6	5.4	8.5	5.8	8.2	3.7	5.1

Onde ( - ) representa soldas sem formação de lente.

**Figura 43: Medição da lente de solda na posição D1.**

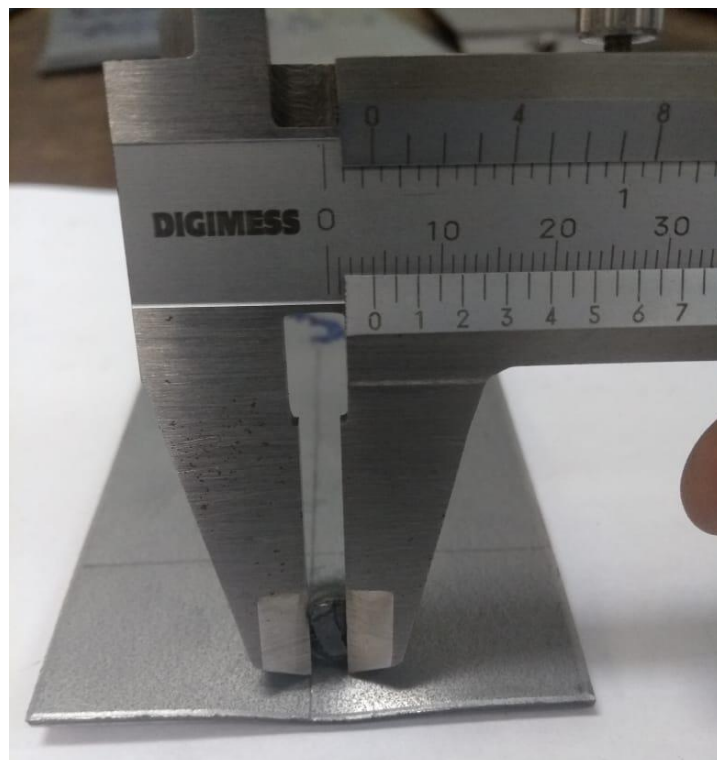


**Figura 44: Medição da lente de solda na posição D2.**



**Figura 45: Medição da lente de solda.**





**Figura 46: Medição da lente de solda.**



**Figura 47: Medição da lente de solda.**

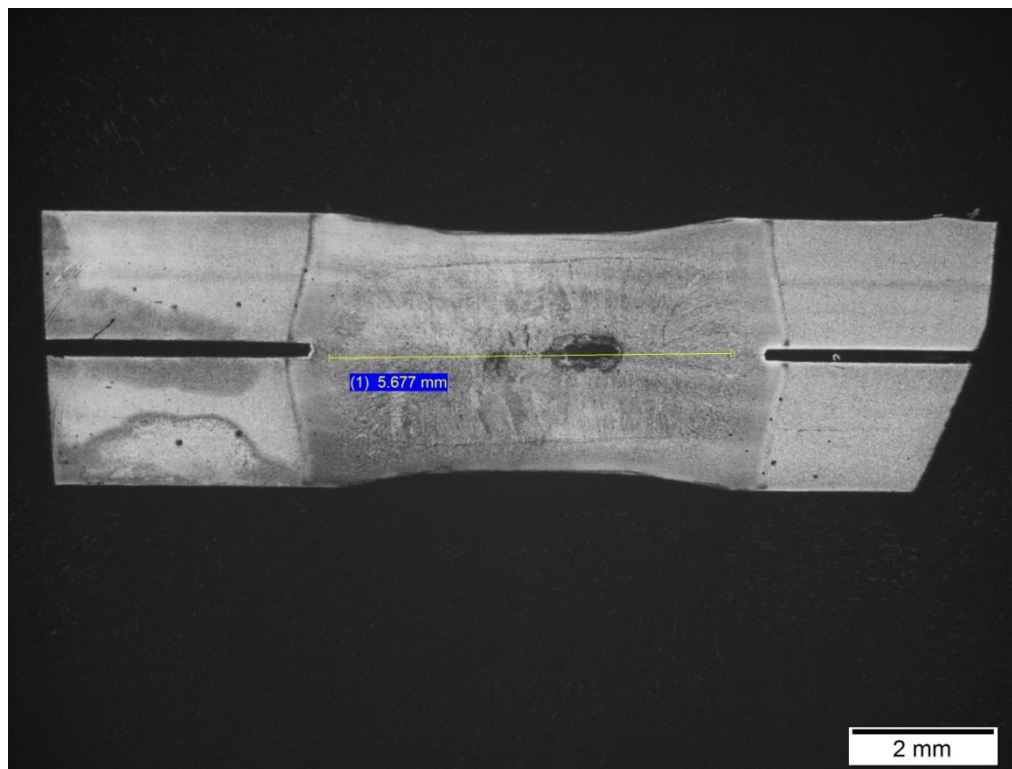
#### 4.4. Micrografia Óptica e Microdureza

Com a utilização do microscópio óptico, foram geradas imagens em escala de 12,5x das 6 amostras correspondentes mencionados anteriormente no tópico 3.3.2. Com esses dados, pôde-se medir o diâmetro da lente de solda das mesmas, de modo a comparar com os obtidos pelo ensaio de tração.

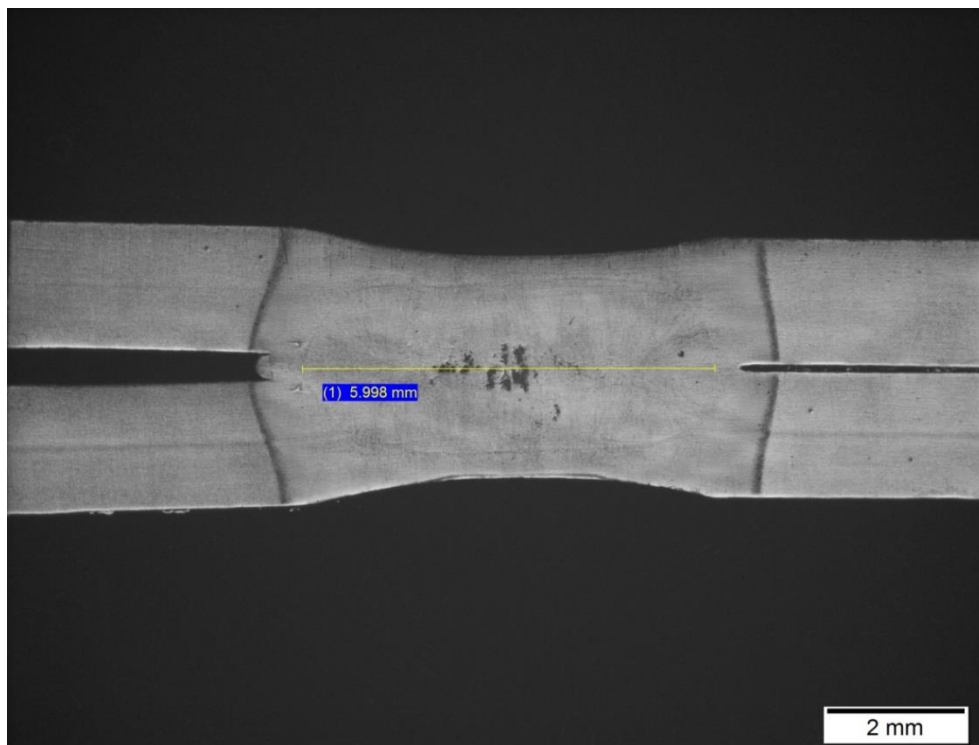
Embora a norma AWS D8.9-97 se utilize para medição do diâmetro da lente posterior ao ensaio de arrancamento como parâmetro de qualidade, devido à rigidez e espessura da chapa de aço GA utilizada como corpo de prova, o método supracitado se mostrou adequado para uma análise mais acurada do resultado. A Tabela 18 exibe a medição de diâmetro das lentes de solda que podem ser vistas nas Figuras 48 a 53. Nas Figuras 54 e 55 são mostradas imagens da lente após o ensaio de microdureza com suas indentações.

**Tabela 18: Relação do diâmetro das lentes de solda obtidas através do microscópio óptico.**

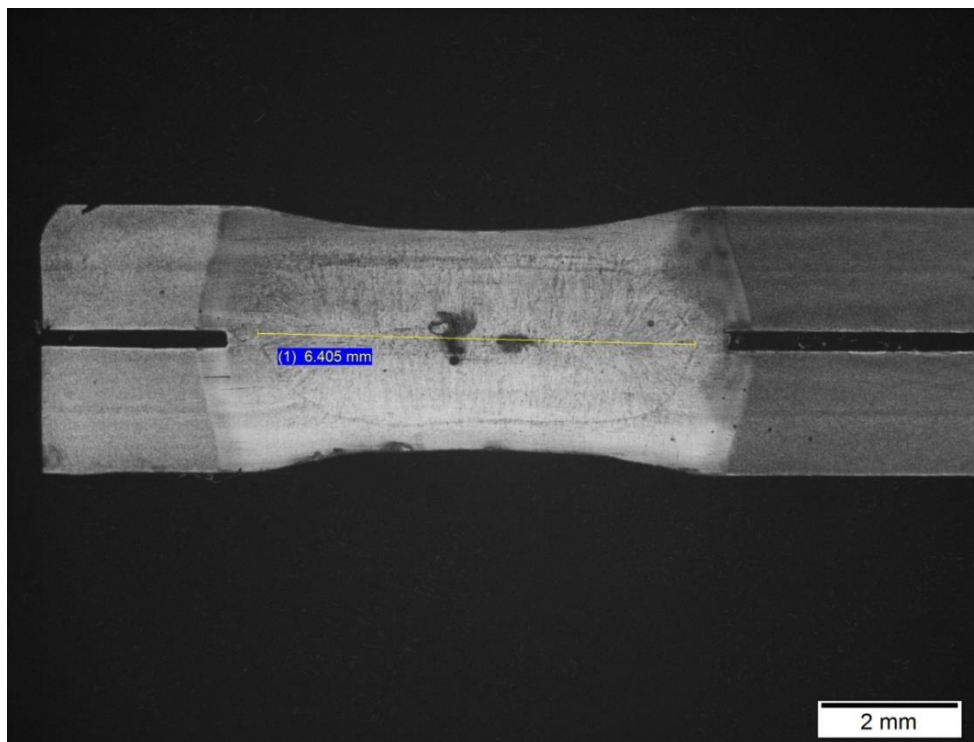
AMOSTRAS	DIÂMETRO (mm)
65 % - 20 cy	5.7
65 % - 25 cy	6.0
65 % - 30 cy	6.4
85 % - 20 cy	6.1
85 % - 25 cy	6.4
85 % - 30 cy	5.7



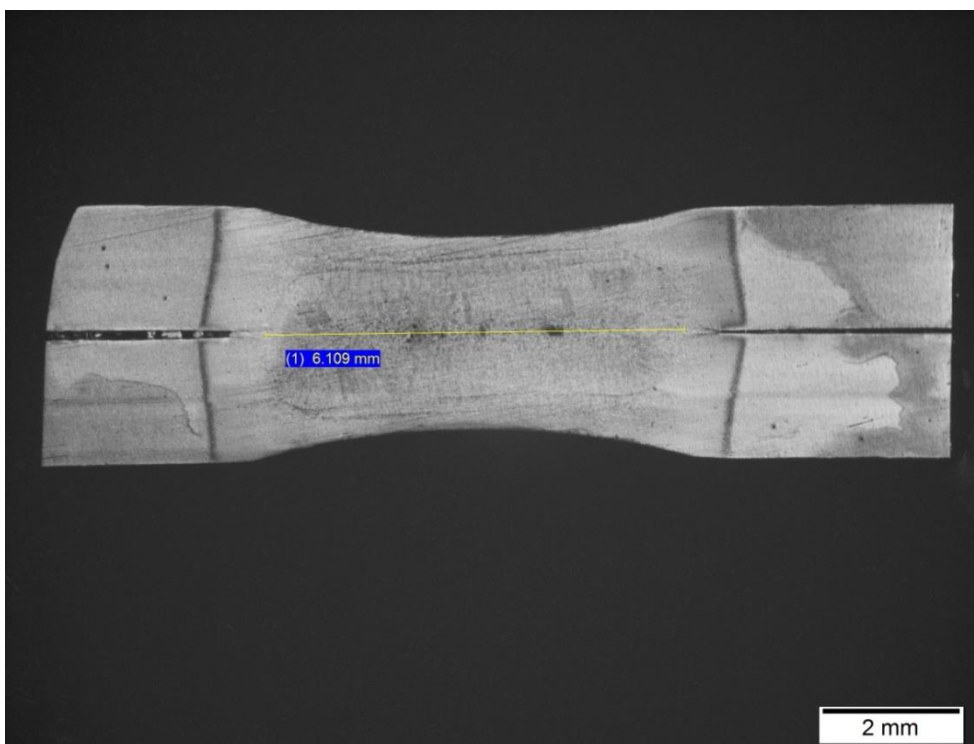
**Figura 48: Amostra 65 % - 20 cy, ampliação de 12,5 x.  
Ataque Nital a 3%.**



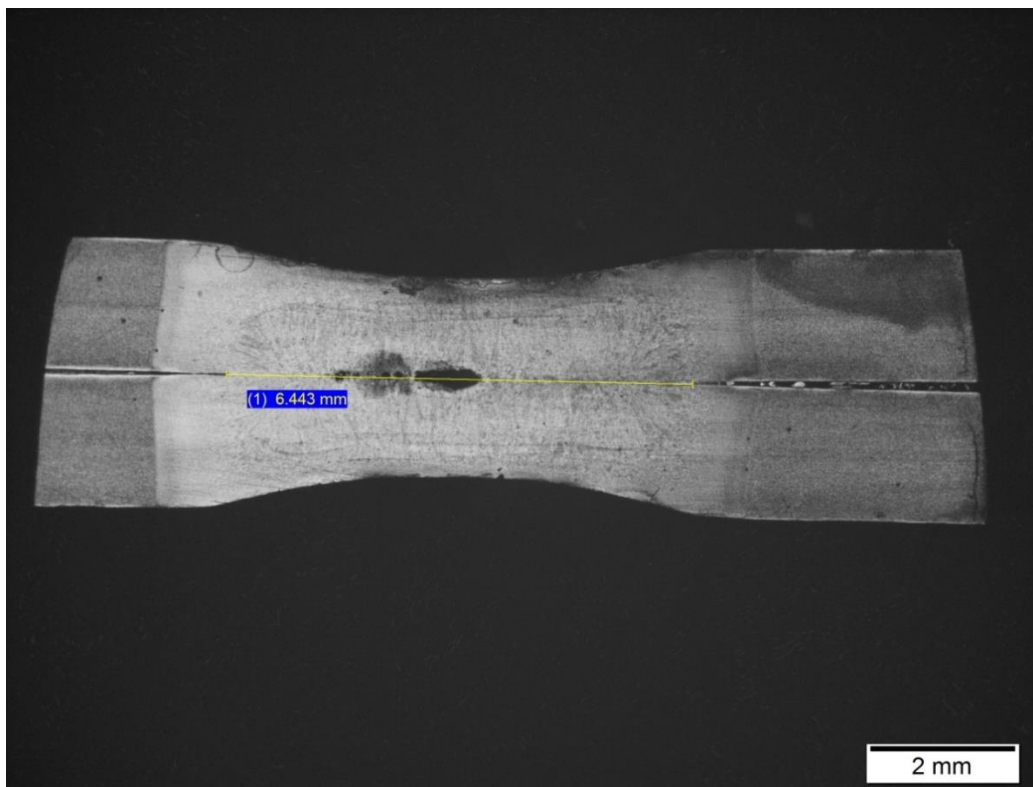
**Figura 49: Amostra 65 % - 25 cy, ampliação de 12,5 x.  
Ataque Nital a 3%.**



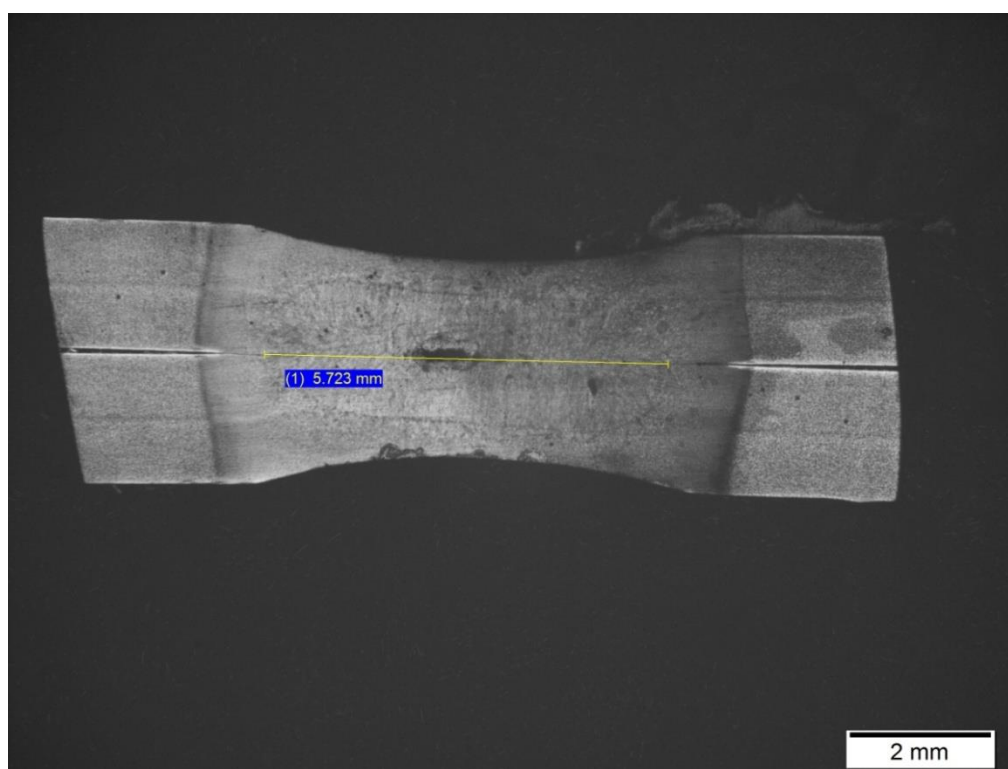
**Figura 50: Amostra 65 % - 30 cy, ampliação de 12,5 x.  
Ataque Nital a 3%.**



**Figura 51: Amostra 85 % - 20 cy, ampliação de 12,5 x.  
Ataque Nital a 3%.**



**Figura 52: Amostra 85 % - 25 cy, ampliação de 12,5 x.  
Ataque Nital a 3%.**



**Figura 53: Amostra 85 % - 30 cy, ampliação de 12,5 x.  
Ataque Nital a 3%.**

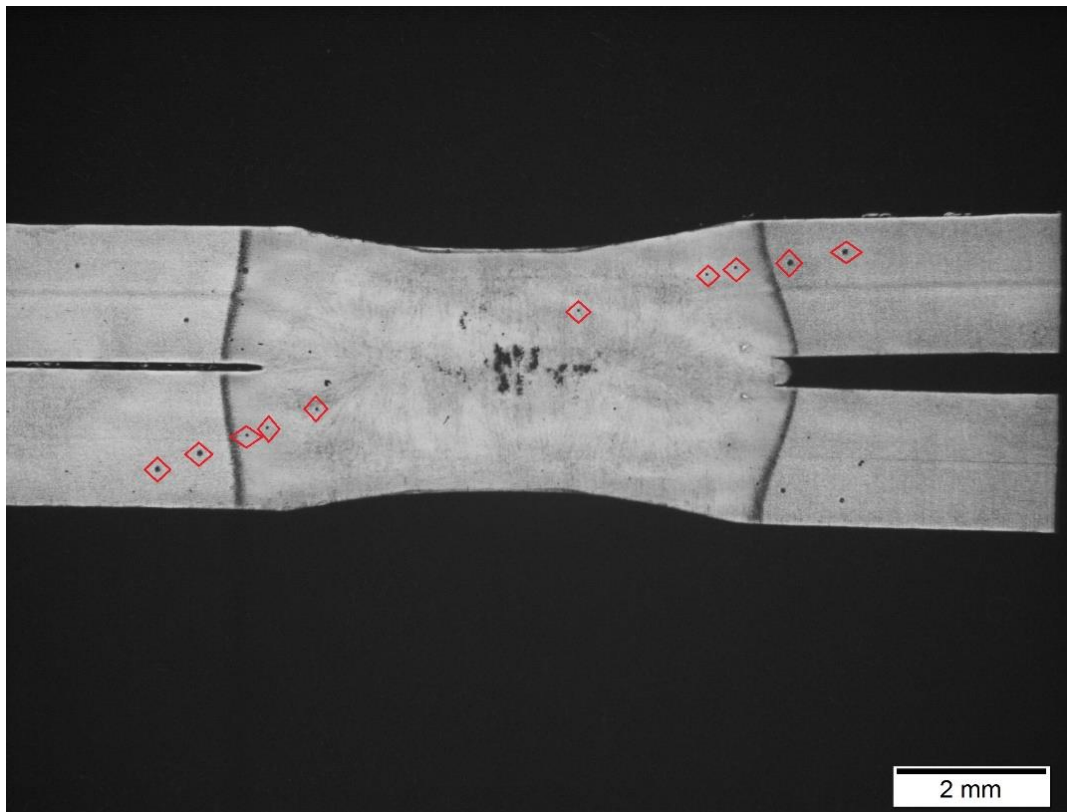


Figura 54: Indentação dos pontos de microdureza na amostra 65 % - 25 cy, ampliação de 12,5 x.  
Ataque Nital a 3%.

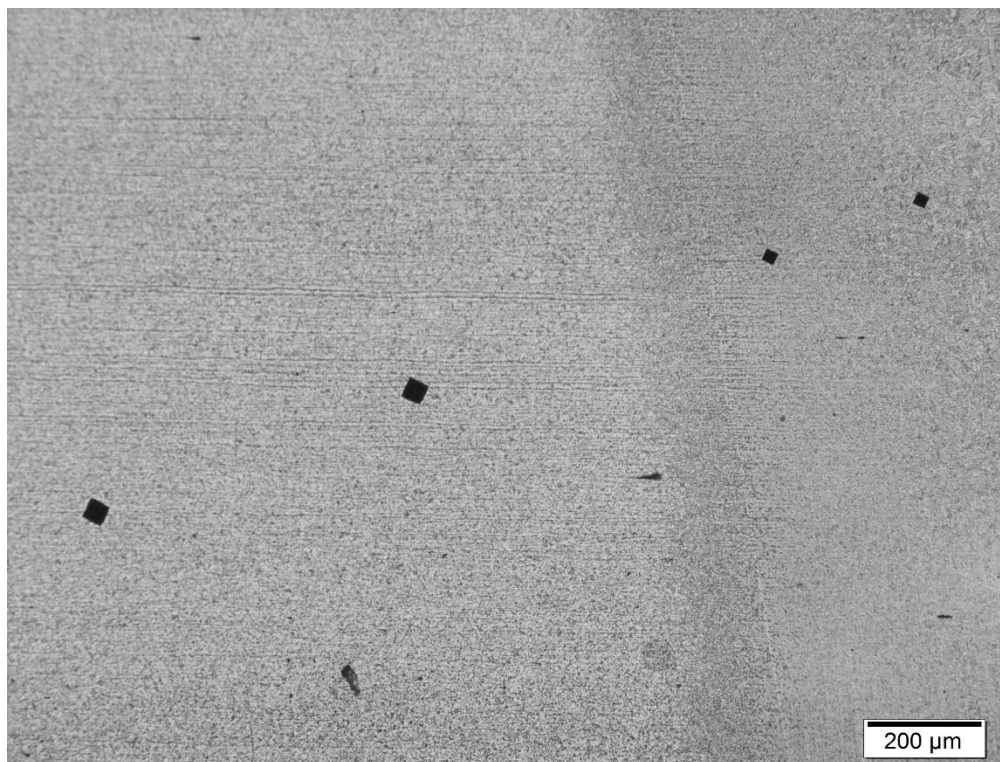


Figura 55: Indentação dos pontos de microdureza na amostra 65 % - 25 cy na transição metal  
base/zta, ampliação de 100 x.  
Ataque Nital a 3%.

## **Capítulo 5**

### **5. Discussão**

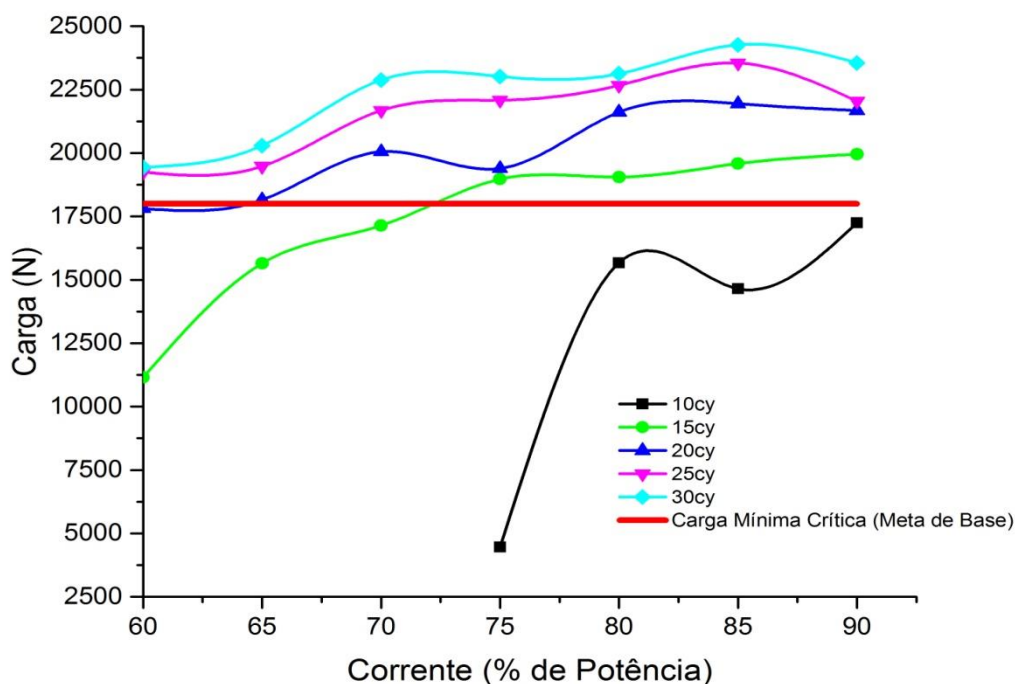
Mediante aos resultados expostos, nos subitens seguintes pode-se discutir comportamento da chapa GA quando submetida ao processo de soldagem por resistência.

#### **5.1. Resistência Mecânica**

##### **5.1.1. Primeira Fase**

Os resultados oriundos dos ensaios de cisalhamento foram organizados em gráficos relacionando a resistência mecânica das juntas com os parâmetros de soldagem de corrente e tempo de soldagem.

Para a análise dos resultados da primeira fase de soldas foi gerado um gráfico cruzando os dados de carga máxima de cisalhamento com o tempo de soldagem e a corrente utilizada. O gráfico é apresentado na Figura 56.



**Figura 56: Gráfico de curva das condições de soldabilidade do aço GA com valores de carga máxima de ruptura referente à primeira fase.**

Primeiramente, observa-se que há uma curva ascendente de tempo de soldagem em relação à carga máxima de ruptura. Como exemplo, para a série de 10 ciclos, somente a partir da série de 75 % foram produzidas juntas com união e mesmo assim abaixo da carga mínima crítica. Em contrapartida com um longo tempo de solda, caracterizado pelas faixas de 20, 25 e 30 ciclos, obteve-se, em geral, os melhores resultados com destaque para a série de 25 e 30 ciclos, as quais geraram amostras que ultrapassaram os limites de resistência do metal base – estimado em 18 kN - mesmo em baixa potência (série de 60 %), enquanto tempos de soldagem menores não atingiram seus requisitos mínimos com tanta frequência.

Segundo Aures (2006), para tempos de solda muito curtos a corrente de soldagem deve ser muito alta para se atingir o calor necessário para a fusão do material.

A análise dos resultados da faixa de potência de 90 % denuncia o fenômeno de expulsão de material devido ao alto aporte de calor gerado pela passagem de corrente. Apesar dos valores de carga ainda serem altos, da ordem de 23,6 kN (Figura 22), estes ainda estão abaixo dos obtidos com 85% (Figura 21).



Aures (2006) explicita que a resistência ao cisalhamento aumenta consideravelmente na faixa entre os níveis de solda mínima e expulsão, sendo esta faixa, por esse parâmetro, a ideal para se efetuar a solda.

Importante ressaltar também que o fenômeno de expulsão de material fragiliza a junta, diminuindo sua capacidade de absorver impactos e vibrações, além de danificar o eletrodo, reduzindo, assim, sua vida útil (RMWA, 1989).

### 5.1.2. Segunda Fase

A partir da seleção para a segunda fase descrita anteriormente, as novas juntas da série de 65 % - 85 % com 20 cy, 25 cy e 30 cy foram analisadas. As Figuras 57, 58 e 59 exibem os pontos de média de carga máxima de ruptura e seus respectivos desvios padrão das amostras T1, T2 e T3 de 20 cy, 25 cy e 30 cy, respectivamente.

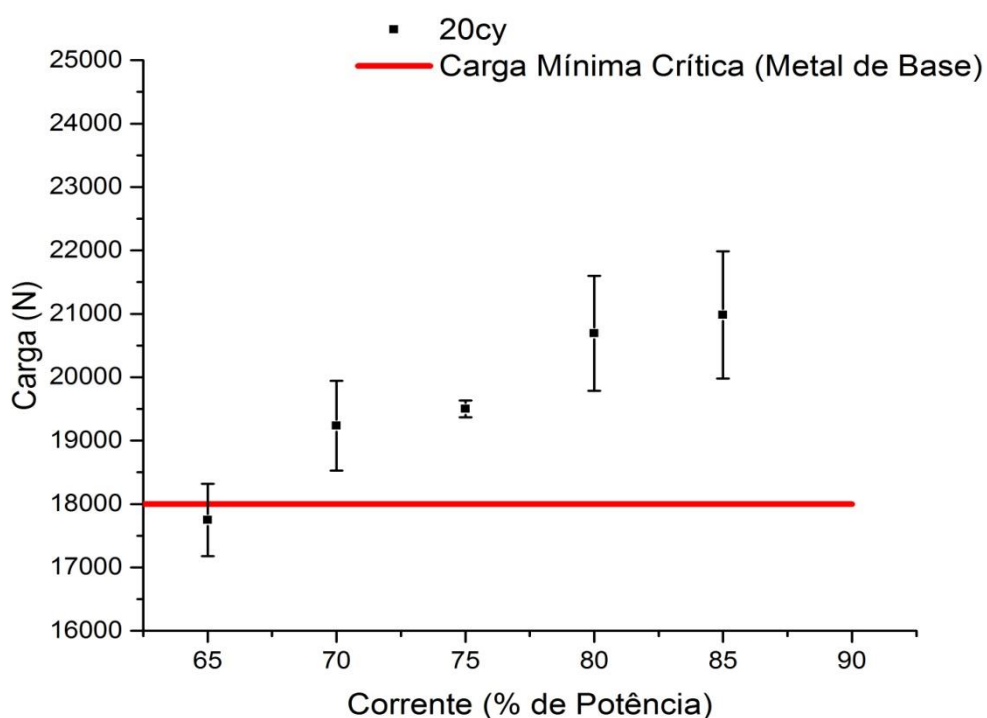


Figura 57: Gráfico de média de cargas máximas de amostras 20 cy e desvio padrão.

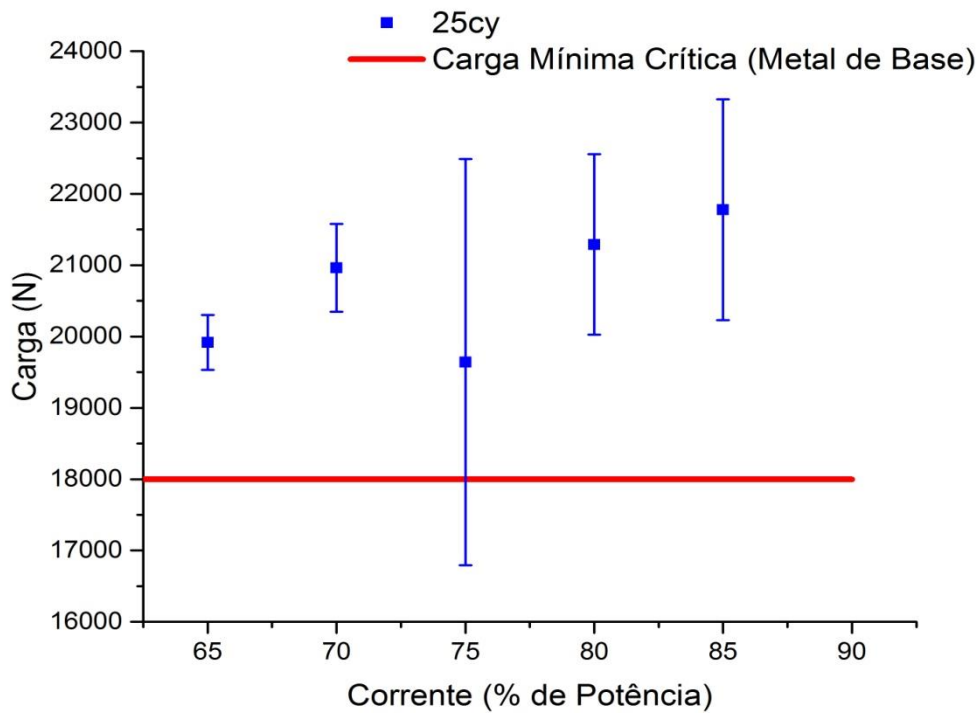


Figura 58: Gráfico de média de cargas máximas de amostras 25 cy e desvio padrão.

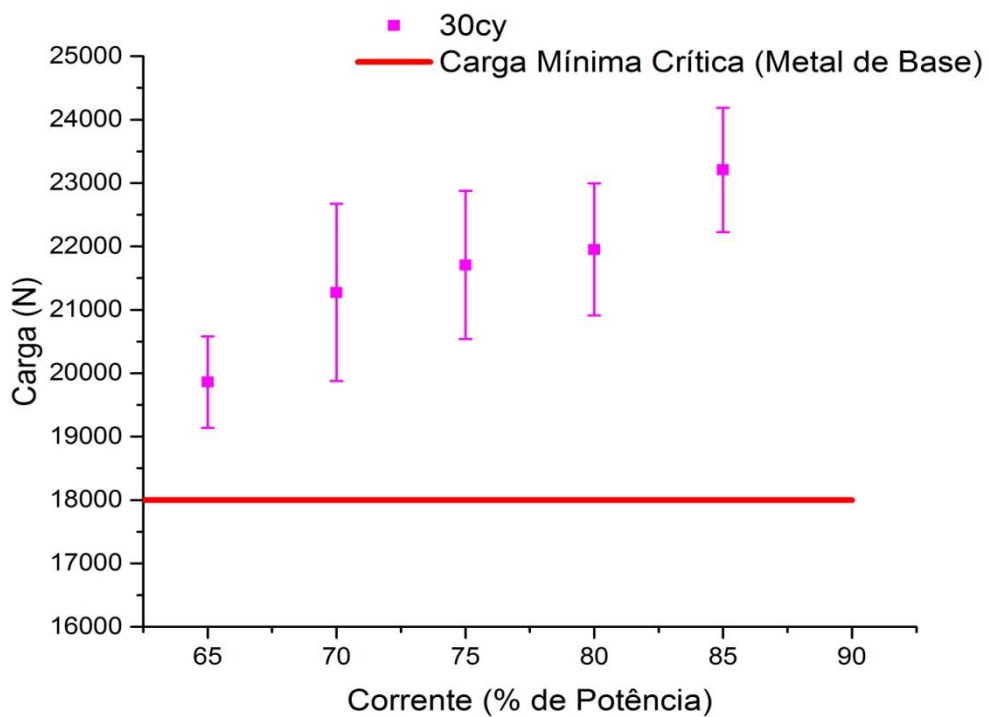
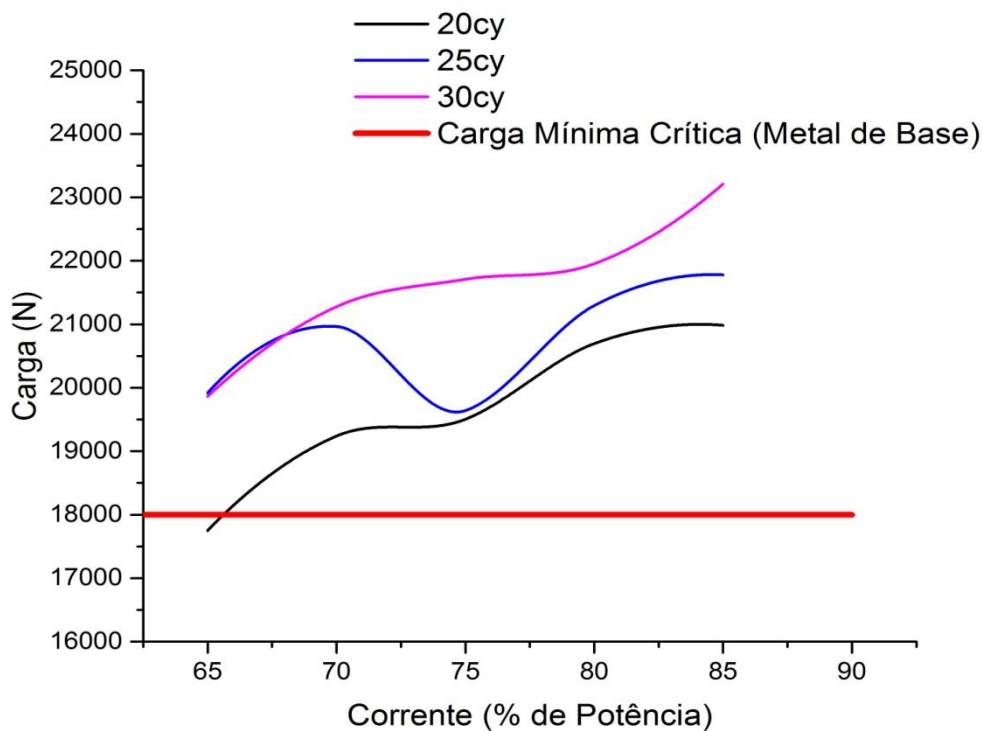


Figura 59: Gráfico de média de cargas máximas de amostras 30 cy e desvio padrão.

Além dos gráficos anteriores, foi gerado um gráfico cruzando os valores médios de carga máxima de ruptura com os parâmetros de soldagem de corrente e tempo de soldagem. O gráfico está representado na Figura 60.



**Figura 60:** Gráfico de curva das condições de soldabilidade do aço GA com valores médios de carga de ruptura.

Pelos gráficos observa-se que a carga de ruptura é diretamente proporcional ao valor de potência empregado no processo. O corpo de prova que obteve o máximo de resistência mecânica ao cisalhamento foi o de 85% a 30 ciclos, de acordo com a Figura 60 com passagem de corrente de 8,38 kA e com um pico de 29,7 kVA como indicado na Tabela 10.

Tumuluru (2007) encontrou o valor de 23,8 kN de carga de ruptura para o aço GA 780 com corrente de 10,3 kA no processo de solda, conforme Figura 61, condizente com o resultado obtido com a amostra do presente projeto, sendo esta até menor.

**Tabela 19: Resultado do Teste de Cisalhamento para aços GA e GI 780 por Tumuluru.**

Tipo de Revestimento	Corrente de Soldagem [kA]	Resistência a Tensão Cisalhante Média [N]
HDGA	10.3	23800 (Lentes com 6.90 mm completamente arrancadas)
HDGI	11.7	25600 (Lentes de 7.00 mm com Fratura Interfacial)

Fonte: Tumuluru (2007), modificado.

## 5.2. Diâmetro de Lente de Solda

### 5.2.1. Primeira Fase

Como dito anteriormente, o parâmetro mais utilizado para mensurar a qualidade de juntas soldadas a ponto é o tamanho médio do diâmetro da lente (AWS C1.1M/C1.1, 2012). Isso é compreensível, pois esse parâmetro consegue distinguir juntas de um modo que a análise pela tensão máxima de ruptura não consegue.

Primeiramente, para uma junta ser considerada válida, deve possuir o diâmetro médio maior que o  $\varnothing_{crit}$  (Diâmetro Mínimo Crítico) que consiste em uma fórmula normatizada em função da espessura da chapa a ser soldada, conforme a Equação 1.

$$\varnothing_{crit} = 4\sqrt{t} \quad (1)$$

Onde,

$t$  = espessura da chapa.

Como a chapa de Aço GA fornecida possui 1,80 mm de espessura e utilizando-se da Equação 1, tem-se que  $\varnothing_{crit} = 5,4$  mm.

O  $\varnothing_{nominal}$  de cada amostra é medido pela média entre o Diâmetro Máximo e Mínimo da lente obtidas do arrancamento pelo ensaio de tração, explícita na Equação 2.

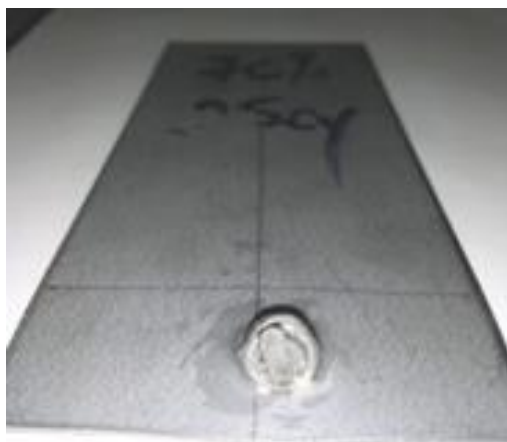
$$\varnothing_{nominal} = (D_1 + D_2)/2 \quad (2)$$

A tabela 20 relaciona os Diâmetros Nominais ( $\varnothing_{\text{nominal}}$ ) com o Diâmetro Mínimo Crítico ( $\varnothing_{\text{crit}}$ ) de 5.4 mm.

**Tabela 20: Relação entre Diâmetros Nominais T1 e Diâmetro Crítico previsto em norma.**

Potência (%)	Tempo (cy)	$\varnothing_{\text{nominal}}$ (mm)	Situação
60	30	5.225	Fora
65	20	2.3	Fora
65	25	8.1	Ok
65	30	5.3	Fora
70	20	5.0	Fora
70	25	5.0	Fora
70	30	4.9	Fora
75	20	9.4	Ok
75	25	7.1	Ok
75	30	6.3	Ok
80	15	5.6	Ok
80	20	6.7	Ok
80	25	4.4	Fora
80	30	5.6	Ok
85	15	5.5	Ok
85	20	7.1	Ok
85	25	5.5	Ok
85	30	6.2	Ok
90	10	3.6	Fora
90	15	4.2	Fora
90	20	4.6	Fora
90	25	4.6	Fora
90	30	4.7	Fora

Algumas lentes que ficaram com diâmetros menores do que os esperados se comportaram dessa forma justamente por uma ruptura no interior da lente de solda, formando em uma das chapas uma lente arrancada de forma irregular, como mostrado na Figura 61.



**Figura 61: Corpo de Prova 70 % - 25 cy.**

A Figura 62 exemplifica um comportamento satisfatório da junta soldada após o ensaio de cisalhamento ao romper-se na material base, evidenciando que, justamente, a lente de solda e a zona termicamente afetada suportam cargas superiores, além de estar dentro do requisito de diâmetro mínimo da norma.



**Figura 62: Corpo de Prova 75 % - 20 cy.**

É possível observar no gráfico da Figura 63, as combinações entre corrente e tempo de soldagem em relação ao Diâmetro Mínimo Crítico estabelecido em norma.

O gráfico foi gerado a partir do cruzamento dos dados obtidos de corrente de soldagem, tempo de soldagem e diâmetro de lente de solda dos corpos de prova.

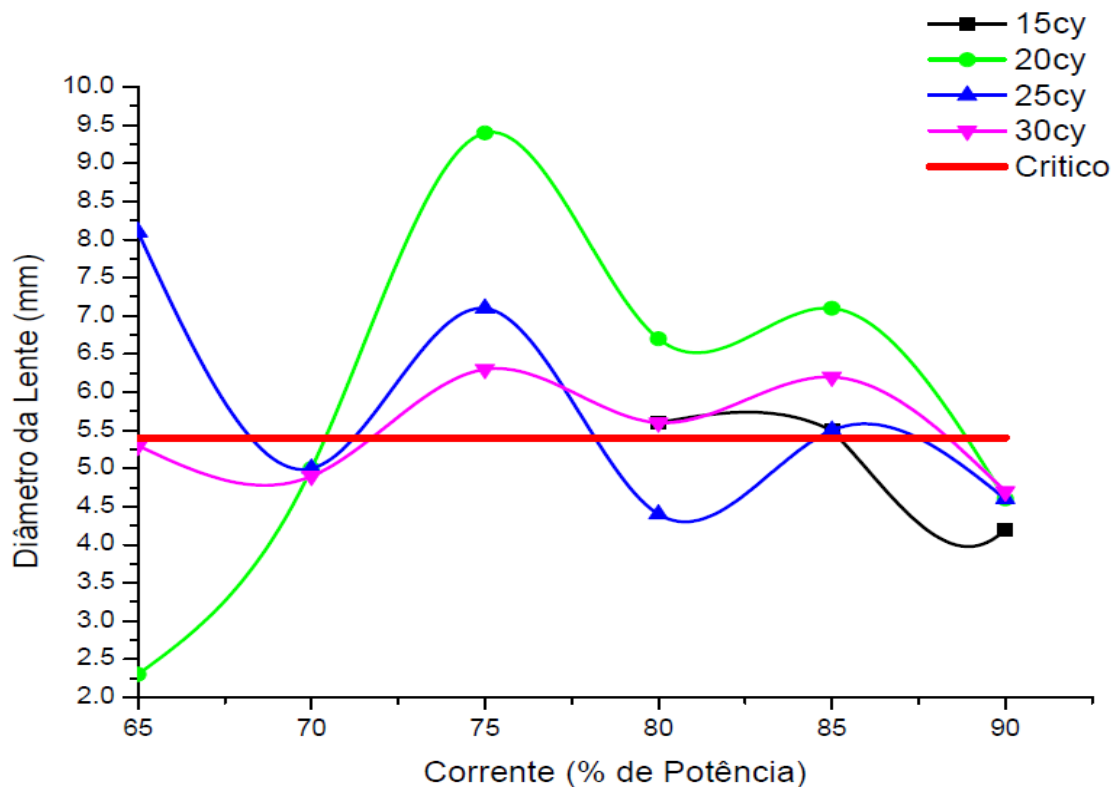


Figura 63: Gráfico de curva das condições de soldabilidade do aço GA com valores de diâmetro de lente.

### 5.2.2. Segunda Fase

Foram medidas as lentes se solda dos corpos de prova da segunda bateria de ensaios de cisalhamento. Os resultados das medições e sua comparação com os valores das amostras de mesmo parâmetro da primeira fase e com o Diâmetro Mínimo Crítico ( $\varnothing_{crit}$ ) de 5.4 mm estão listados na Tabela 21. As medições marcadas com um hífen ( - ) não apresentaram formação de lente de solda por sofrerem fratura interfacial.

**Tabela 21: Relação entre Diâmetros Nominais T2 e T3 e Diâmetro Crítico previsto em norma.**

Potência (%)	Amostra	Tempo (cy)	$\varnothing_{nominal}$ (mm)	Situação
65	T2	20	7.8	Ok
	T3	20	8.5	Ok
	T2	25	7.4	Ok
	T3	25	8.0	Ok
	T2	30	11.0	Ok
	T3	30	9.0	Ok
70	T2	20	8.6	Ok
	T3	20	8.5	Ok
	T2	25	-	Fora
	T3	25	7.8	Ok
	T2	30	5.9	Ok
	T3	30	6.2	Ok
75	T2	20	8.5	Ok
	T3	20	-	Fora
	T2	25	5.2	Fora
	T3	25	-	Fora
	T2	30	6.3	Ok
	T3	30	7.0	Ok
80	T2	20	9.5	Ok
	T3	20	-	Fora
	T2	25	6.4	Ok
	T3	25	-	Fora
	T2	30	4.5	Fora
	T3	30	7.0	Ok
85	T2	20	4.2	Fora
	T3	20	-	Fora
	T2	25	-	Fora
	T3	25	5.2	Fora
	T2	30	4.0	Fora
	T3	30	4.4	Fora



A partir desses dados, pôde-se refinar os resultados gerando 4 gráficos, listados nas Figuras 64, 65, 66 e 67.

As Figuras 64, 65 e 66 exibem os pontos de média de diâmetro da lente e seus respectivos desvios padrão das amostras T1, T2 e T3 das amostras de 20 cy, 25 cy e 30 cy, respectivamente. A Figura 68 mostra o cruzamento dos valores médios de carga máxima de ruptura com os parâmetros de soldagem de corrente e tempo de soldagem.

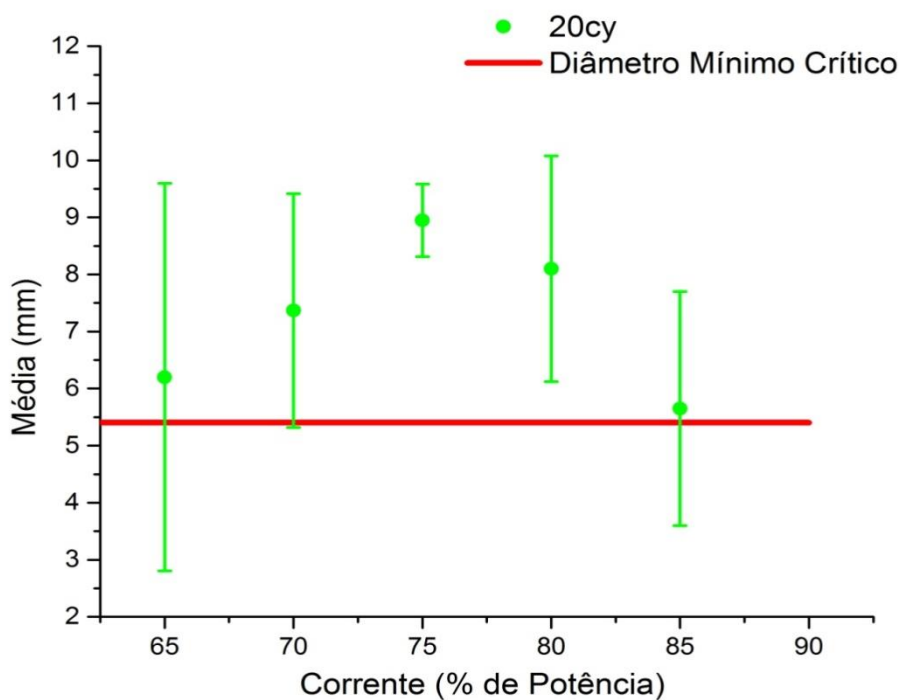


Figura 64 – Gráfico de média de tamanho de diâmetros da lente de amostras 20 cy e desvio padrão.

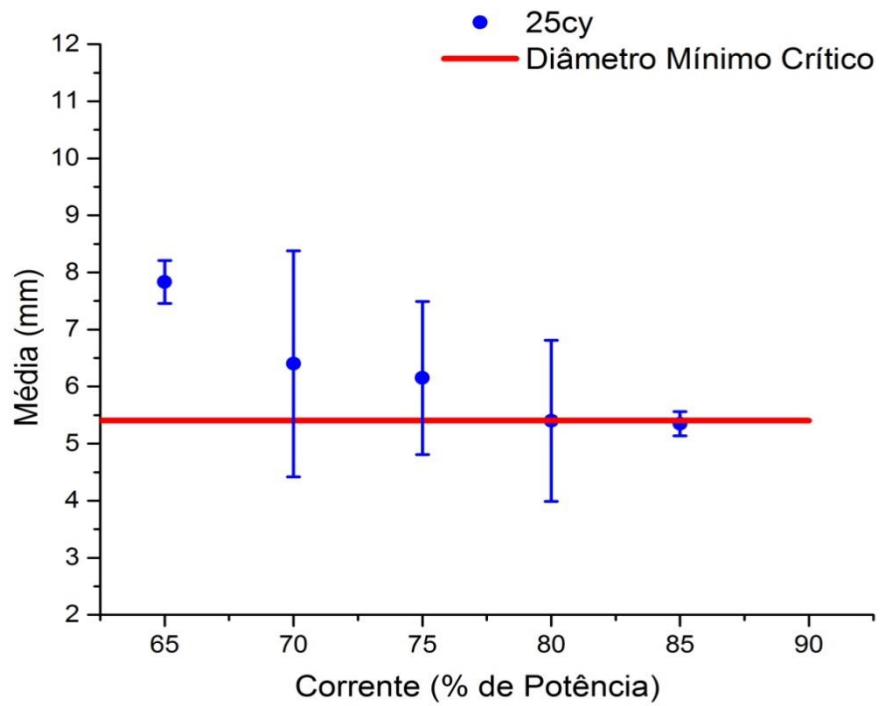


Figura 65 – Gráfico de média de tamanho de diâmetros da lente de amostras 25 cy e desvio padrão.

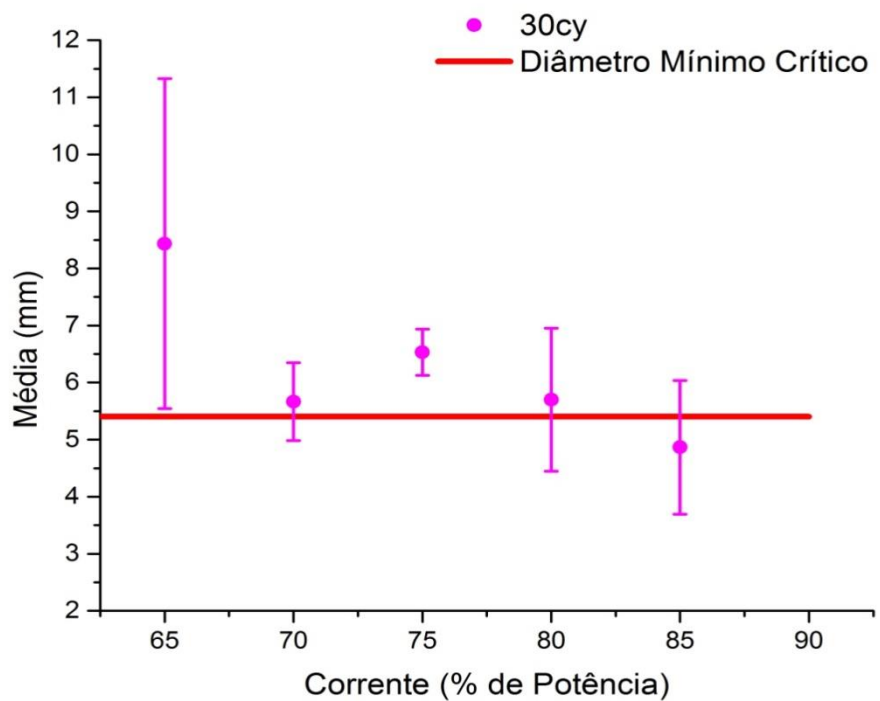
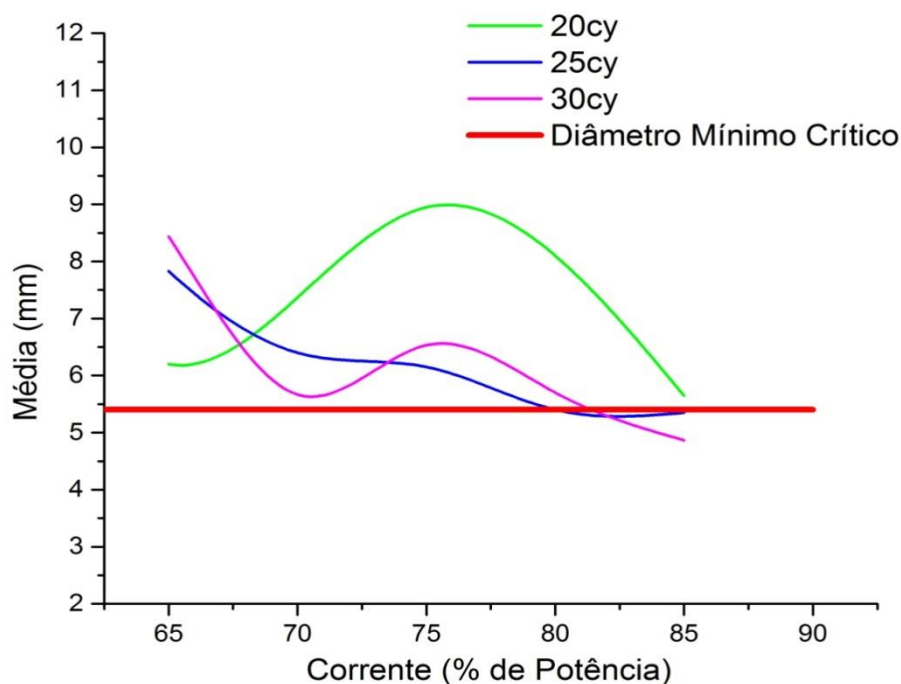


Figura 66 – Gráfico de média de tamanho de diâmetros da lente de amostras 30 cy e desvio padrão.



**Figura 67 – Gráfico de curva das condições de soldabilidade do aço GA com valores médios de diâmetro de lente.**

Em geral, conforme o aumento do aporte térmico nas realizações da solda, a fratura parecia se comportar de modo mais frágil, com cada vez menos deformação antes do rompimento. O Zn, por ser um bom condutor térmico, aumenta a taxa de resfriamento da junta o que pode proporcionar um endurecimento mediante a temperabilidade do material (HAYAT, 2011).

A fratura de caráter frágil quando não gera botão de solda apreciável para medição (ocorre algo similar a um descolamento), gera um botão de dimensões menores do que o Diâmetro Crítico Mínimo. Exemplos de casos como esse são expostos na Figura 68. Nota-se que em todos eles, houve evidente expulsão de material na junta.



**Figura 68: Corpos de prova 75-20 T3, 75-25 T3, 80-25 T3 e 85-25 T2.**

Alguns corpos de prova que obtiveram valor apreciável e acima do valor de Diâmetro Crítico Mínimo da norma foram soldados com valores de corrente baixa dentro do range estudado, com exceção das amostras de 20 cy que apresentam uma curva ascendente até 75 %.

As soldas que obtiveram bom desempenho no critério de dimensão da lente, apresentaram rasgamento externo à lente de solda e não apresentaram expulsão de material aparente. As amostras com essas características estão expostas na Figura 69.



**Figura 69: Corpos de prova 65-25 T2, 65-30 T2 e 70-30 T3.**

### 5.2.3. Análise dos Diâmetros no Microscópio Óptico

Diante de uma maior perspectiva de precisão perante o método utilizado para medição do diâmetro da lente de solda, os valores de diâmetro da lente advindos das imagens formadas pelo microscópio óptico foram comparados com as medições via paquímetro a posteriori ao ensaio de cisalhamento. Tal comparação é exposta na Tabela 22. Os valores abaixo do  $\varnothing_{crit}$  estão indicados com um asterisco (\*) ao lado do valor.

**Tabela 22: Comparação entre diâmetros da lente obtidos via microscopia e via paquímetro.**

Diâmetro da Lente (mm)				
Amostra	Microscopia	T1	T2	T3
65%-20cy	5.7	2.3*	7.8	8.5
65%-25cy	6.0	8.1	7.4	8.0
65%-30cy	6.4	5.3*	11.0	9.0
85%-20cy	6.1	7.1	4.2	-
85%-25cy	6.4	5.0*	-	5.2
85%-30cy	5.7	6.2	4.0	4.4

Observa-se que o aço GA possui uma boa soldabilidade devido ao fato de possuir uma gama de opções de parâmetros disponíveis para se obter uma solda de diâmetro de lente satisfatório.

### 5.3. Análise de Microdureza

Os perfis de microdureza se mostraram semelhantes para cada faixa de potência utilizada. Tanto nas amostras de 65 % e 85 %, expostas nas Figuras 70 e 71, respectivamente, os perfis de microdureza se comportaram de forma similar à relatada na literatura de Tumuluru (2007), Figura 72, na qual a dureza da ZTA tem valores similares ou de maior valor que as encontradas na zona fundida.

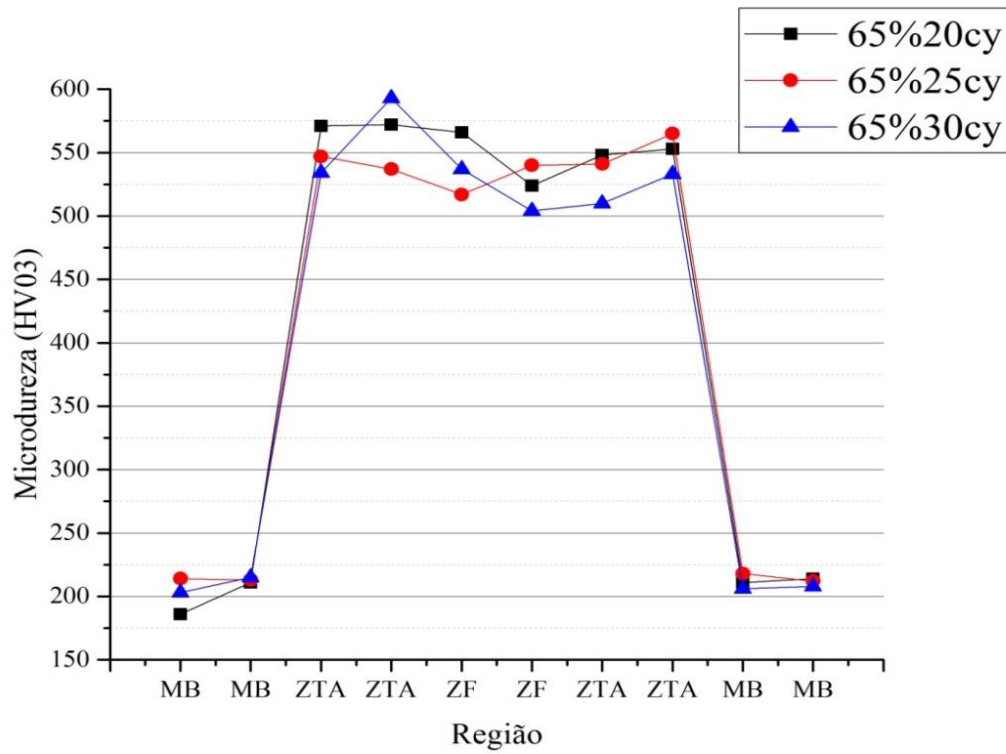


Figura 70: Gráfico de microdureza HV03 x Região da Lente para CP's de 65%.

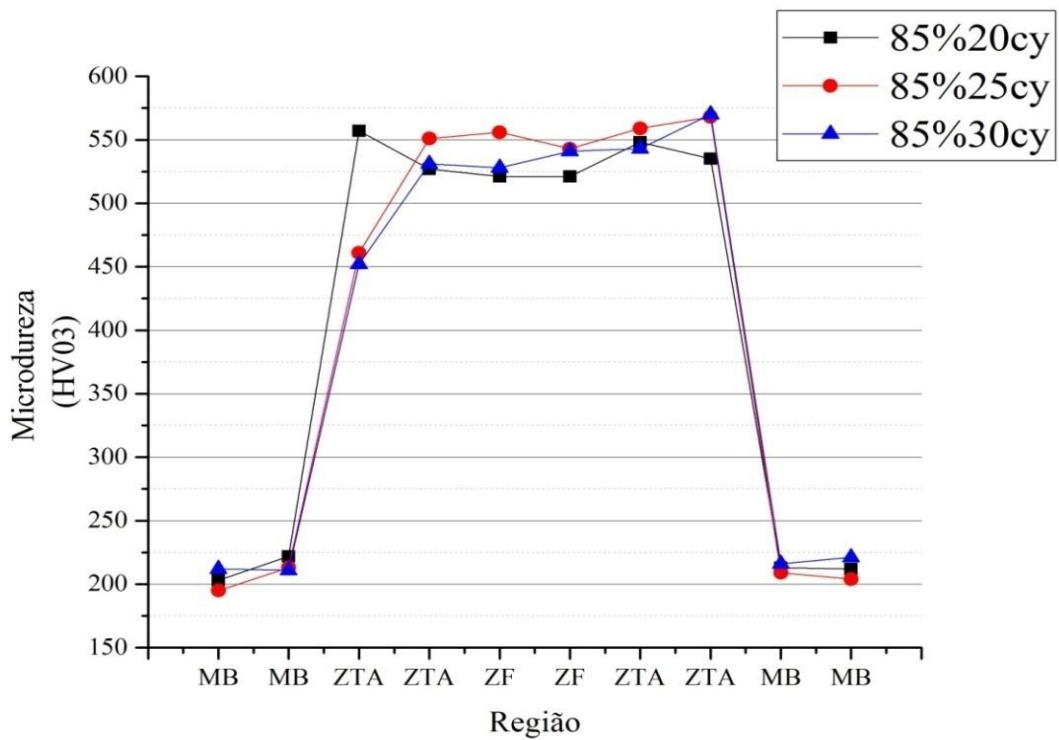
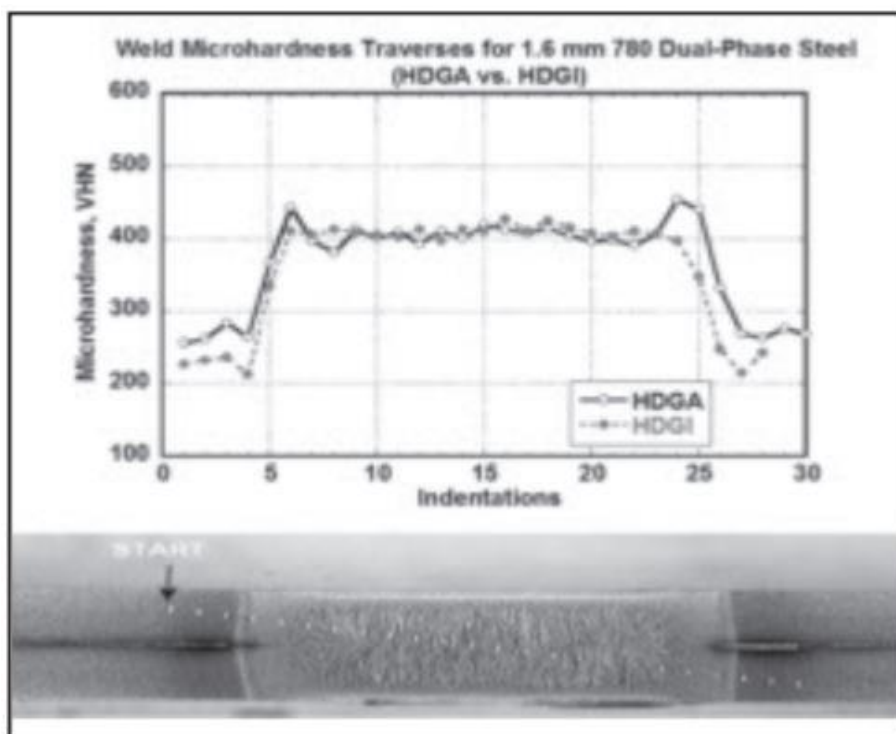


Figura 71 - Gráfico de microdureza HV03 x Região da Lente para CP's de 85%.



**Figura 72 - Perfil de Microdureza de Aço Bifásico.**  
**Fonte: Tumuluru (2007), modificado.**

De acordo com Aures (2006), a dureza da zona fundida exerce algum efeito na resistência por tensão cisalhante, porém contribui ainda mais para a falha na solda quando esta é submetida a forças de impacto ou vibração. Para esta situação, uma dureza excessiva pode resultar em falhas devido a trincas e fadiga. Em alguns casos é empregado um intervalo de pós solda com a finalidade de evitar um esfriamento muito rápido do material onde as trincas ou rachaduras podem aparecer.

Os resultados dos ensaios realizados não mostraram esse comportamento, sendo que a série de 85 %, apesar de obter os maiores valores de resistência à tensão cisalhante, não apresentou dureza excessiva na zona fundida.

## Capítulo 6

### 6. Conclusão

Ante o exposto no presente projeto, algumas conclusões acerca do processo de soldagem e escolha de parâmetros puderam ser inferidas.

A resistência mecânica da junta é diretamente proporcional à potência utilizada no processo de soldagem e no tempo de soldagem empregado no processo até o momento onde se verifica expulsão de material da junta.

A resistência mecânica da junta não é diretamente relacionada à medida de diâmetro da lente.

Apesar de maior carga necessária, o rompimento de juntas com alta resistência pode ocorrer devido à propagação de trincas no interior da lente de solda, inviabilizando a lente de cumprir com os requisitos de diâmetro mínimo estabelecido em norma.

Os resultados da microdureza demonstraram que para o aço GA, tanto nas faixas de 85 % de potência quanto nas de 65 %, os valores mais altos se concentram na ZTA.

Os melhores parâmetros de solda foram obtidos com tempo de soldagem altos – acima de 20 cy – e faixas de corrente entre 65% a 85% de potência da máquina de 75 kVA.

A melhor escolha de parâmetros de soldagem encontrada a partir das análises feitas foi representada pelas amostras de 65 % com 30 cy.

O aço GA, liga de Zn e Fe, mostrou-se ser um aço de boa soldabilidade quando soldado pelo processo de soldagem por resistência, podendo ser utilizados em várias faixas de parâmetros de soldagem.



## Capítulo 7

### 7. Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Comparação entre o aço GA e aço GI (com percentual maior de Zn);
- Maior número de amostras;
- Análise de microdureza de outros parâmetros;
- Análise da microestrutura metalográfica da junta no MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura);
- Ensaio de arrancamento por dobramento com máquina motorizada;
- Estudo sobre desgaste do eletrodo.

## 8. Referências Bibliográficas

ANTONIO P. J., MARCOS, “Avaliação das juntas soldadas utilizando o processo de soldagem a ponto na indústria automobilística”, Revista Técnico-Científica do CREA-PR, 2ª edição, 2014.

ARCSERVICE. Inovação e Tecnologia Em Soldagem. 2013. Disponível em: <<http://www.arcservice.com.br/content.php?pagenome=Solda-por-Resistencia>>. Acessado em: 29 out. 2019.

AURES, J. E. V., “Estudo da Formação, Geometria e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistência: Uma Abordagem Estatística”. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2006.

AWS C1.1M/C1.1, “Recommended Practices for Resistance Welding”, 2012

AWS C1.4M/C1.4, “Specification for Resistance Welding of carbon and Low Alloy Steels”, 2009

AWS D8.7M, “Recommended Practices for Automotive Weld Quality - Resistance Spot Welding”, 2005.

DOLFI, J. W. et al. “Resistance Spot and Seam Welding”. In: O'BRIEN, A.; GUZMAN, C. Welding Handbook: Welding Processes, part. II. ed. 9, v. 3, pp. 728. Miami: Welding American Society, 2007.

DUBOIS, M. “Present & Future of The Hot Dip Galvanized Process”. Proceeding of the International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet. Galvatech. Chicago, 1995.

FENABRAVE. Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores. 2019.

Disponível

em:<http://www3.fenabrave.org.br:8082/plus/modulos/listas/index.php?tac=indic>

es-e-numeros&idtipo=1&layout=indices-e-numeros>. Acessado em: 11 set. 2019.

FONSECA, F. A. V., “Efeito do substrato dos aços IF nas propriedades do revestimento Galvannealed”, 2006.

FURLANETO, V., “Soldagem por resistência”, Instituto de Engenharia de São Paulo, II Soldares, 2004.

GOVIK, Alexander. “Modelling of the resistance welding spot process”. Master Thesis. Department of Management and Engineering. Linköping University. Linköping, 2009.

HAYAT, F. “Comparing Properties of Adhesive Bonding, Resistance spot welding, and Adhesive Weld Bonding of Coated and Uncoated DP 600 Steel, 2011.

INTERMACHINERY , Soldagem a Ponto de Chapas Zincadas, 2000

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; BRACARENSE, A. Q., “Soldagem Fundamentos e Tecnologia”, UFMG, 3ª edição, 2011.

POURANVARI, M.; MARRASHI, S. P. H., “Critical review of automotive steels spot welding: process, structure and properties”. Science and Technology of Welding and Joining. Institute of Materials, Minerals and Mining, v. 18, n. 5, pp. 361-403, 2013.

RMWA. Resistance Welding Manual, Resistance Welder Manufacturing Association. U.S.A., ed. 4, p. 443. Nov, 1989.

TUMULURU, M., “The effects of Coatings on the Resistance Spot Welding Behavior of 780 MPa Dual-Phase Steel”. Welding Research. Welding Journal, v. 86 pp.161s-169s, Jun. 2007.

ZHOU, K.; KAI, L. "Study on Effects of Electrode Force on Resistance Spot Welding Process". Journal of Applied Physics. AIP Publishing LLC. v. 116, 2014.