

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SOLDAGEM A LASER EM TAMBORES DE EMBREAGEM

por

Luis Felipe Ruga

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2020

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

### CIP - Catalogação na Publicação

Ruga, Luis Felipe  
Soldagem a LASER em Tambores de Embreagem / Luis  
Felipe Ruga. -- 2020.  
15 f.  
Orientador: Arnaldo Ruben Gonzalez.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2020.

1. Soldagem a LASER. 2. Box-Behnken. 3. Metodologia  
de Superfície de Resposta (MSR). I. Gonzalez, Arnaldo  
Ruben, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Luis Felipe Ruga

SOLDAGEM A LASER EM TAMBORES DE EMBREAGEM

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Heraldo Amorim  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Porto Alegre, novembro de 2020

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela trajetória a qual ele me conduziu e proporcionou, à minha família por sempre priorizar a educação e valores aos quais me foram investidos, à minha esposa pelo companheirismo e compreensão, além de amigos que me acompanharam durante esta jornada. Gostaria de agradecer ainda à Stihl Ferramentas Motorizadas por disponibilizar os equipamentos e os recursos necessários, aos profissionais e colegas Anderson Nobrega Barros, Diego Lovatel Zollner e Everton Luis da Silva pelos ensinamentos e apoio técnico, aos quais viabilizaram o desenvolvimento do presente trabalho.

## APOIO FINANCEIRO

Agradeço ao apoio dado pela empresa Stihl Ferramentas Motorizadas pelo fornecimento de amostras de tambores de embreagem, bem como disponibilidade dos equipamentos usados para testes e desenvolvimento deste trabalho.

## EPÍGRAFE

*Há 3 tipos de mentiras:  
mentiras,  
mentiras graves, e  
dados estatísticos.*

*Benjamin Disraeli*

Ruga, Luis Felipe. Soldagem a LASER em tambores de embreagem. 2020. 15 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a investigação dos efeitos dos parâmetros da soldagem a LASER no resultado da força de extração das juntas soldadas entre tambores de embreagem com suas respectivas luvas de roçadeiras FS 85 STIHL, visando, assim, buscar um conjunto de parâmetros que ofereçam uma maior resistência mecânica para a junta e, também, atender os requisitos exigidos em normativas do produto. Através de um projeto de experimentos Box-Behnken, com três parâmetros independentes (potência da máquina, velocidade de avanço e distância focal), variando em três níveis cada um, foram realizados cordões de solda autógena. Para esse processo foi atingido valores de força de extração entre 4,6 e 11,8 kN, possibilitando criar as superfícies de resposta através de modelos estatísticos sobre a combinação dos parâmetros. Foi verificada a significância da potência sobre os resultados da força de extração e evidenciada a combinação de parâmetros para a força de extração máxima teórica de 14,8 kN.

O presente trabalho demonstra uma das etapas técnicas de um projeto de internalização de um componente, onde busca-se alternativas aos processos atuais de fabricação com possibilidade de retorno financeiro para a empresa.

**PALAVRAS-CHAVE:** Internalização, Box-Behnken, Soldagem a LASER, Metodologia de Superfície de Resposta (MSR).

Ruga, Luis Felipe. LASER welding on clutch drums. 2020. 15 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

## ABSTRACT

This work aims to investigate the effects of LASER welding parameters on the result of the extraction force of welded joints between clutch drums with their respective axis of brush cutters FS 85 STIHL. Thus, looking for a set of parameters that offer stronger mechanical resistance for the joint and follow the requirements in product standards. Through a Box-Behnken design project, with three independent parameters (machine power, welding speed and focal length), varying at three levels each, autogenous weld beads were made. For this process, extraction force values between 4.6 and 11.8 kN were reached, making it possible to create the response surfaces through statistical models on the combination of parameters. The significance of the power over the results of the extraction force was verified and the combination of parameters for the maximum theoretical extraction force of 14.8 kN was evidenced.

The present work demonstrates one of the technical steps of a project to internalize a component, where alternatives are sought to the current manufacturing processes with the possibility of payback for the company.

**KEYWORDS:** Internalization, Box-Behnken, LASER welding, Response Surface Methodology (RSM).

## NOMENCLATURA

### Símbolos

Pot	Potência do LASER	[W]
$v$	Velocidade de avanço do LASER	[mm/s]
D. F.	Distância focal do LASER à superfície da peça	[mm]
F	Força de Extração	[kN]

### Abreviaturas e acrônimos

LASER	<i>“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”</i> ou Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação
TEM	<i>“Transverse Eletromagnetic Mode”</i> ou Modo Transversal Eletromagnético
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO.....	2
2.1 SOLDAGEM POR BRASAGEM.....	2
2.2 LASER TIPO GÁS.....	2
2.3 SOLDAGEM LASER POR CONDUÇÃO E SOLDAGEM LASER POR FURO CONTROLADO ( <i>KEYHOLE WELDING</i> ) .....	3
2.4 PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM LASER.....	4
2.5 METODOLOGIA DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA .....	6
2.6 PROJETO DE EXPERIMENTOS BOX-BEHNKEN .....	6
3. CASO DE ESTUDO .....	7
3.1 APRESENTAÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL .....	8
4. RESULTADOS .....	9
4.1 ANÁLISE DE TRINCAS.....	9
4.2 ANÁLISE DA FORÇA DE EXTRAÇÃO .....	10
4.3 MICROGRAFIA .....	14
5. CONCLUSÃO.....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	16
APÊNDICE A – PROJETO DE EXPERIMENTO BOX-BEHNKEN APLICADO A SOLDAGEM A LASER EM TAMBORES DE EMBREAGEM.....	17
APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	18
APÊNDICE C –MICROESTRUTURAS.....	19

## 1. INTRODUÇÃO

Embreagens centrífugas são elementos mecânicos comumente utilizados em motosserras e roçadeiras, e sua função básica é transmitir o torque proveniente do eixo do motor para o elemento de transmissão, além de amortecer as vibrações e proteger o motor de sobrecargas. Esse tipo particular de embreagem funciona através da própria rotação do eixo principal do motor, quando em uma determinada velocidade angular, por força centrípeta, os contrapesos pivotados da embreagem expandem e são atritados contra a pista interna dos tambores de embreagem. O atrito proveniente das duas partes faz com que o momento seja transmitido de um eixo para o outro, fazendo assim o movimento relativo do elemento de corte para esse tipo de máquina. O tambor de embreagem, por sua vez, é unido com a luva ou eixo através de uma solda conhecida como brasagem, a qual este estudo buscou iniciar o processo de substituição, pois faz parte de uma proposta de redução de custo do componente, tendo em vista que a brasagem hoje é realizada por uma empresa terceira.

De acordo com Machado (1996) existem três grandes grupos de processos dedicados à união de materiais, os quais são a Soldagem, a Brasagem e a Solda Branda, além dos adesivos. Cada um desses três grupos mencionados possui distintas aplicações e particularidades. Denomina-se soldagem o processo que visa a união localizada de materiais, similares ou não, de forma permanente, baseada na ação de forças em escala atômica, semelhantes às existentes no interior do material. Ainda, segundo Machado (1996), soldagem é, sem dúvida, o grupo que mais se destaca devido, principalmente, ao seu largo emprego e grande volume de atividades que envolve.

De acordo com Eagar (1993), existem muitos processos de soldagem por fusão, e uma das maiores dificuldades para o engenheiro de fabricação é determinar qual processo produzirá propriedades aceitáveis pelo menor custo. Não há respostas simples. Qualquer mudança na geometria da peça, no material, no volume de produção, na eficiência global do processo produtivo, bem como no valor do produto final, pode influenciar a escolha do método de união.

Ainda segundo Eagar (1993), um grande percentual de falhas em produtos ocorre nas juntas, pois geralmente estão localizadas nos pontos de maior concentração de tensão em uma montagem e, portanto, são as partes mais críticas das mesmas. Uma atenção cuidadosa aos processos de união pode produzir grandes recompensas na economia de fabricação e na confiabilidade do produto, trazendo maior competitividade econômica para uma empresa. Constantemente são elaborados novos estudos de redução de custo de fabricação e ganho de performance nesse segmento de mercado.

Silveira (2012) destaca a importância de analisar a geometria do cordão de solda, bem como a análise do perfil de micro durezas. Destaca, ainda, os principais parâmetros que interferem no resultado de soldagem a LASER e sugere a combinação dos resultados com ensaios mecânicos de tração. Ensaios estes, que são exigidos pelas normativas que regem os tambores de embreagem na empresa Stihl Ferramentas Motorizadas®.

Conforme explanado por Baumgaertner Filho et. al (2017), tendo em vista a complexidade na seleção dos parâmetros do processo de soldagem, o projeto de experimentos Box-Behnken, aliado à metodologia da superfície de resposta, auxilia na correlação desses parâmetros independentes à resposta.

Portanto, este trabalho busca responder: Nos tambores de embreagem das roçadeiras FS 85 Stihl, como a variação dos parâmetros do processo de soldagem a LASER afeta a resistência mecânica da junta tambor-luva? Qual a resistência mecânica máxima que pode ser obtida? No processo de soldagem LASER, é possível obter a resistência mecânica (força de extração) da junta superior ao mínimo requerido de 7,5 kN?

## 2. FUNDAMENTAÇÃO

### 2.1 SOLDAGEM POR BRASAGEM

A brasagem é o processo de soldagem onde se utiliza a adição de um metal diferente dos metais base. A particularidade do processo está nas propriedades de capilaridade e molhabilidade que o material a adicionar exerce sob a junta. As partes são fixadas muito próximas e o trabalho é realizado através de uma atração molecular entre as superfícies, não havendo fusão do metal base, e sim do material de adição, segundo Kalpakjian e Schmid (2001). Este é o processo de união utilizado atualmente nos tambores de embreagem das motosserras e roçadeiras STIHL®.

O tambor de embreagem é montado por interferência com a luva, e um cordão de liga de cobre é posicionado na junta. Após formar um determinado lote, a carga é carregada para um forno industrial, e aquecida até a uma temperatura de fusão da liga de cobre, sem fundir os metais base (tambor-luva). A liga preenche a junta, e após resfriamento está realizada a união das partes.

Normalmente, a brasagem é utilizada em tambores de embreagem centrífugos, pois a aplicação de temperaturas mais baixa na união com a luva implica em menor empenamento da peça, o que reflete menor oscilação do tambor durante a operação. A oscilação é prejudicial para o componente, pois acelera desgaste e vibração, podendo levar desde desconforto para o usuário, como também quebra do equipamento.

### 2.2 LASER TIPO GÁS

O equipamento utilizado no estudo é uma máquina de corte e solda a LASER com ressonador da marca TRUMPF®, modelo TLF3000t. Esse tipo de ressonador possui como meio ativo o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), e adicionados os gases hélio (He) e nitrogênio ( $\text{N}_2$ ). Segundo Machado (1996), a excitação do LASER a gás pode ser realizada através de rádio frequência, com os eletrodos no exterior da cavidade ressonante, o que aumenta a vida útil dos mesmos e minimiza o consumo do gás. O nitrogênio é prontamente excitado, pois sua molécula necessita relativamente pouca energia para alcançar o nível superior, similar à do dióxido de carbono. Desta forma, a energia molecular vibracional do nitrogênio excitado é transmitida para o  $\text{CO}_2$  através de colisões. Quando as moléculas de  $\text{CO}_2$  retornam para um estado intermediário de energia, emitem um fluxo contínuo de fótons no infravermelho. Por sua vez, colisões com o hélio fazem que o dióxido de carbono volte mais rapidamente ao seu nível de energia mínimo, permitindo o ciclo iniciar novamente, e que maiores potências possam ser alcançadas. Além disso, devido ao fato do hélio possuir alta condutividade térmica, a dissipação do calor ocorre em uma taxa mais elevada.

Na solda a LASER, uma particularidade operacional é a absorção da energia, onde os materiais à temperatura ambiente refletem parcialmente o LASER, principalmente considerando aquele produzido pelo  $\text{CO}_2$ . Entretanto, a absorção do infravermelho pelos metais aumenta rapidamente quando os pontos de fusão e vaporização são alcançados. Por isso, quando estudada alternativas para processos de união de componentes mecânicos, é necessário traçar uma estratégia para a obtenção dos melhores parâmetros de soldagem para àqueles materiais em específicos.

Em geral, a absorção de energia pelos metais é menor que 10 % à temperatura ambiente; 50% no ponto de fusão e alcança cerca de 90% na vaporização. Especialmente para soldagem, a densidade de potência do feixe deve ser tal que a temperatura da superfície da peça se encontre no intervalo de fusão do material, enquanto que no corte, a mesma pode ser suficientemente alta para vaporizá-lo, proporcionando estreita ZAC (Zona termicamente afetada pelo calor) e pequena distorção. Isso é conseguido através de um feixe com reduzido diâmetro, conclui Machado (1996).

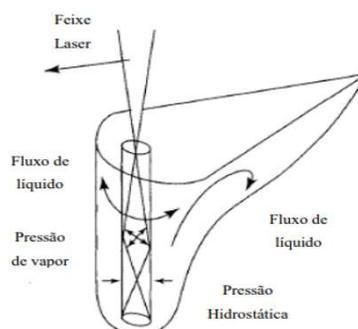
### 2.3 SOLDAGEM LASER POR CONDUÇÃO E SOLDAGEM LASER POR FURO CONTROLADO (*KEYHOLE WELDING*)

Segundo Silveira (2012), na soldagem por condução o feixe de LASER é focado sobre o material, causando a fusão do mesmo sem que ocorra uma sublimação significativa. Usualmente a intensidade fica na ordem de  $1.000 \text{ W/mm}^2$ . Existem dois modos de efetuar uma solda por condução a laser: por aquecimento direto ou por transferência de energia.

Na soldagem LASER por aquecimento direto, a condução do calor é governada entre a fonte de calor e a superfície afetada do material, onde este funde superficialmente, e conseqüentemente, gera a junta. Apenas uma pequena porção superficial do material é fundida, devido à reduzida área de atuação do feixe de LASER. A geometria da junta pode ser comparada à geometria observada nos processos convencionais de soldagem ao arco elétrico, tendo um perfil mais arredondado com reduzida razão de largura/profundidade.

Soldagem LASER por furo controlado, segundo Katayama et al. (2010), a intensidade incidente do laser é tal que ocorre a sublimação do metal. Usualmente a transição de soldagem por condução para a soldagem por furo controlado, inicia-se por volta de  $10.000 \text{ W/mm}^2$ . Esta é baseada na criação de um capilar de metal sublimado (*keyhole*) no interior do material aquecido. A pressão de vapor resultante dentro do material cria um capilar de aproximadamente 1,5 vezes o diâmetro do feixe de laser no ponto focal. Uma poça de metal fundido é formada em volta do capilar de vapor e atinge temperaturas superiores às de poças de fusão de processos tradicionais ao arco elétrico. A pressão hidrostática, a tensão superficial da massa fundida, e a pressão de vapor no interior do capilar atingem um equilíbrio, evitando que o capilar entre em colapso, conforme Figura 1. Para manter esse equilíbrio é necessário um balanço entre velocidade e potência de soldagem à medida que o feixe de LASER avança em relação à superfície da peça.

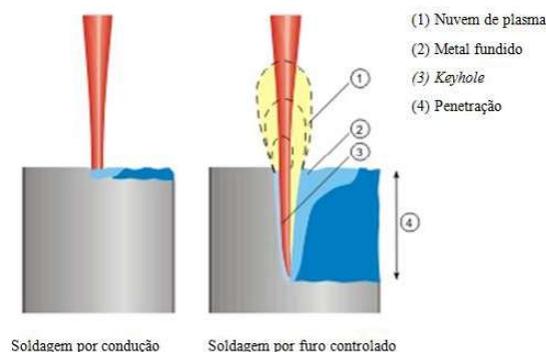
Figura 1 – Processo de soldagem por furo controlado.



Fonte: SILVEIRA, G. V. Efeito da alteração dos parâmetros do processo LASER sobre a geometria do cordão de solda. 2012.

Segundo Heiple et al. (1993), no processo de soldagem por furo controlado, para muitos metais, a pressão do vapor aumenta quase exponencialmente com a temperatura, e se torna efetiva acima de  $4.000 \text{ Pa}$  para um feixe de elétrons operando no vácuo. Próximo a  $0,8 T_b$ , onde  $T_b$  é o ponto de ebulição do material em Kelvin. À medida que a temperatura da superfície se aproxima desse valor, a superfície do líquido sob a fonte de energia é deprimida pela pressão do vapor. A Figura 2 demonstra a comparação entre o processo por condução com o processo por furo controlado (*keyhole*).

Figura 2 – Comparação entre o processo de soldagem por condução e por furo controlado.



Fonte: SILVEIRA, G. V. Efeito da alteração dos parâmetros do processo LASER sobre a geometria do cordão de solda. 2012.

A soldagem por furo controlado produz juntas muito estreitas, com uma alta razão de penetração por largura do cordão. Consequentemente, produz uma ZAC (Zona Termicamente Afetada pelo Calor) muito mais estreita quando comparada a outros processos convencionais de soldagem. Fontes LASER de CO<sub>2</sub> são mais econômicas para a soldagem linear e rotacional de juntas simétricas, já que o feixe pode ser manipulado de maneira relativamente simples com o uso de espelhos.

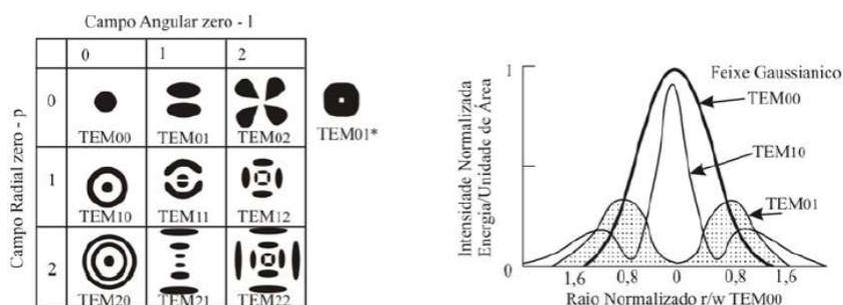
#### 2.4 PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM LASER

A geometria de um cordão de junta soldada a LASER possui influência de diversos parâmetros, sejam eles oriundos do equipamento utilizado para a soldagem ou do material que se deseja soldar. Entre eles, segundo Katayama et al (2010), podem ser citados: diferentes comprimentos de onda, a potência do laser, densidade de potência, qualidade do feixe, diâmetro do feixe, TEM (do inglês: “*Transverse Electromagnetic Mode*”, ou ainda Modo Transversal Eletromagnético), distância entre a peça e o ponto focal, a velocidade de soldagem, a refletividade para o comprimento de onda do feixe, difusividade térmica, tensão superficial, teor de elementos voláteis, fatores ambientais, gás de proteção, o fluxo de gás, e assim por diante.

Segundo Machado (1996), quanto melhor focado o feixe, maior sua qualidade. Por sua vez, o foco depende das características do caminho óptico empregado, bem como do Modo Transversal Eletromagnético. O modo longitudinal é normalmente ignorado na caracterização do feixe, uma vez que tem pouca influência sobre suas características. Já o modo transversal possui influência muito maior e é consequência do forte campo eletromagnético formado pela oscilação da energia no interior da cavidade ressonante, podendo assumir diferentes formas, as quais determinam a distribuição radial de energia do feixe. Ele caracteriza a intensidade máxima do feixe a partir de seu eixo central.

O modo de distribuição dessa energia é caracterizado por dois subscritos à sigla TEM, os quais indicam o número de vales entre regiões de concentração da mesma. A Figura 3 demonstra esquematicamente as características e respectivos índices dos principais TEMs de utilização para o processamento de materiais.

Figura 3 – Modos transversais eletromagnéticos.

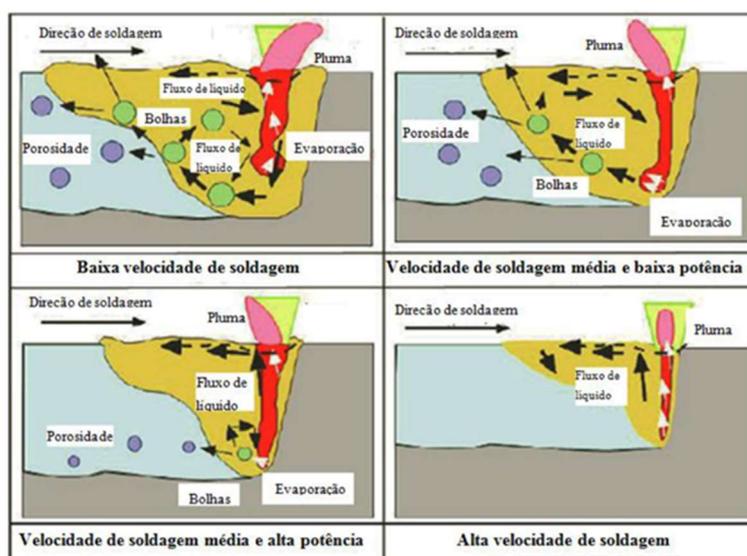


Fonte: SILVEIRA, G. V. Efeito da alteração dos parâmetros do processo LASER sobre a geometria do cordão de solda. 2012.

No modo de distribuição fundamental  $TEM_{00}$ , a distribuição da energia do feixe, na direção ortogonal à sua propagação, possui distribuição Gaussiana. Para uma dada potência, esse modo produz a máxima densidade de energia, com o feixe da melhor qualidade possível. Entretanto, o mesmo não é geralmente preferido para soldagem, mas sim em operações de furar e cortar, pois vaporiza o metal. Além disso, vários fatores influenciam a qualidade do feixe, principalmente quando o mesmo é de alta potência, destacando-se a alteração da difração dos materiais que compõem certos dispositivos do equipamento, devido ao calor, explica Machado (1996). A maioria dos lasers de  $CO_2$  com fluxo axial lento de gás operam em modos de baixos índices devido à geometria longa e estreita do ressonador.

A potência, a velocidade de soldagem e a distância do ponto focal em relação à superfície da peça são os principais parâmetros para o estudo da geometria do cordão de solda, pois dado um equipamento de solda LASER e o material que se deseja soldar são, geralmente, os únicos parâmetros os quais o operador pode ter a liberdade de variar para obter uma geometria do cordão otimizada. Para o processo de soldagem por furo controlado, na Figura 4, é possível ver o comportamento da variação dos parâmetros de potência e velocidade sobre esse processo.

Figura 4 – Representação do comportamento do processo de soldagem por furo controlado, utilizando diferentes velocidades e potências.



Fonte: SILVEIRA, G. V. Efeito da alteração dos parâmetros do processo LASER sobre a geometria do cordão de solda. 2012.

Com baixas velocidades de soldagem o capilar de vapor é mais suscetível a entrar em colapso, dessa forma o feixe de LASER atinge a poça de metal fundido ao invés de sofrer múltiplas reflexões no interior do capilar de vapor. Gerando, assim, um fluxo descendente do metal fundido causado pela pressão de recuo originada da evaporação da frente líquida colapsada. Esse comportamento pode gerar bolhas oriundas da evaporação intensa de metal e consequentemente poros na junta solidificada, segundo Katayama et al. (2010).

Ao aumentar levemente a velocidade de soldagem, uma intensa evaporação se dá à jusante do furo, onde a camada de metal fundido é mais estreita, deformando a região à montante, onde a camada de metal fundido é menos espessa, ocasionando bolhas no metal líquido. Quando a velocidade de soldagem é adequada, a estabilidade do furo e a forma como a pluma é ejetada verticalmente previnem a formação de bolhas de modo que haja pouca ou nenhuma porosidade na junta. Outras formas de prevenir as ocorrências de porosidade são a soldagem com penetração completa, uma leve inclinação do feixe LASER na direção de avanço, frequência de pulsação do laser apropriada, entre outras.

Segundo Katayama et al. (2010), uma penetração mais profunda pode ser formada em materiais base com uma quantidade maior de elementos de liga voláteis e sob uma vazão determinada de gás, ou ainda, no vácuo. Além disso, a facilidade de focar um feixe depende do seu comprimento de onda, o qual é função do meio de ativação; e da sua divergência, que se relaciona com o Modo Transversal Eletromagnético no qual o LASER está operando. Conforme a aplicação, o equipamento e o tipo do LASER, o diâmetro do feixe utilizado pode variar desde cerca de 0,5 até 10 mm, enquanto o comprimento no qual o mesmo se mantém em foco, ou dimensão característica do equipamento, deve alcançar vários milímetros.

## 2.5 METODOLOGIA DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

A metodologia de superfície de resposta (MSR) é, atualmente, o mais popular conjunto de técnicas para otimização, devido a sua completa teoria, eficiência e simplicidade, conforme Box et al (1987). Segundo Ferreira et al. (2007), esse método tem sido frequentemente aplicado à otimização de modelos analíticos, considerando suas vantagens como redução do número de experimentos que precisam ser executados, resultando em menor quantidade de matéria-prima a ser consumida e consideravelmente menos trabalho de laboratório. Além disso, esses métodos permitem avaliar a relevância, bem como a significância estatística dos efeitos dos fatores em estudo, e também como avaliar os efeitos das interações entre eles. A perspectiva gráfica do modelo matemático conduz ao nome de metodologia de superfície de resposta.

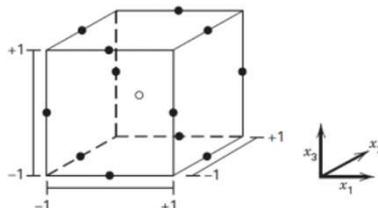
## 2.6 PROJETO DE EXPERIMENTOS BOX-BEHNKEN

Conforme explanado por Baumgaertner Filho et. al (2017), o projeto de experimentos é amplamente aplicado em todas as áreas do conhecimento, e possui como objetivo: planejar, executar e analisar o experimento, mediante uma metodologia científica e amparada por conceitos estatísticos. Esta metodologia é utilizada para otimizar um sistema/processo, e é composta por etapas, iniciando por identificar o problema e quais são as características importantes desse processo.

O projeto Box-Behnken é um dos tipos de MSR, o qual consiste em um projeto com três níveis fatoriais incompletos, que é obtido pela combinação de projetos 2k fatoriais blocados que contém todas as combinações dos três fatores. Box-Behnken é um projeto esférico, onde todos os pontos estão contidos em uma esfera com raio igual  $\sqrt{2}$ , segundo Montgomery (2013). A Figura 5 representa graficamente os três fatores ( $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$ ) e seus três níveis (-1, 0 e 1), onde os círculos pretos representam as combinações de parâmetros de cada ensaio. Este tipo de projeto não realiza nenhum ensaio considerando a combinação dos três valores em níveis

máximos ou mínimos ao mesmo tempo, por esta razão não há círculos pretos nos vértices do cubo. Considerando um experimento com três fatores e três níveis, são realizados 15 experimentos, sendo 12 relacionados as combinações de valores máximos ou mínimos de dois fatores, mais um fator em seu nível médio e três ensaios considerando a combinação dos valores médios para os três fatores (ponto central). O ensaio do ponto central é realizado três vezes para verificar a repetitividade do experimento.

Figura 5 – Box-Behnken três fatores



Fonte: MONTGOMERY, D. C.; “Design and Analysis of Experiments”, USA: John Wiley & Sons, Inc., 8th ed. 2013.

Um dos grandes benefícios do projeto Box-Behnken é seu custo efetivo se comparado com outros métodos, o qual requer um número reduzido de experimentos para obter-se resultados satisfatórios de otimização, segundo Liu et al. (2013). Ainda segundo ele, o projeto Box-Behnken pode ser utilizado para analisar os efeitos principais, interações entre os fatores e o efeito quadrático entre os parâmetros do processo e a variável resposta. Esta relação é gerada através de um modelo polinomial de segundo grau, conforme a Equação 1, onde  $Y$  é a variável resposta,  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$  os fatores controláveis,  $b_0$  a intercepção e  $b_1$  a  $b_{33}$  os coeficientes de regressão.

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 \quad (1)$$

Esta equação foi usada para avaliar os efeitos de três variáveis independentes sobre as respostas e, assim, determinar a condição ótima que produza um cordão de solda de qualidade aceitável, além da maximização da resposta força de extração da luva.

### 3. CASO DE ESTUDO

Primeiramente foram analisados os requisitos e normativas internas exigidas pela empresa relativa ao componente em sua condição atual de soldagem. Nas normativas constam os procedimentos de como devem ser realizados os testes de verificação da força de extração mínima necessária para separar o eixo ou luva do tambor de embreagem, bem como os locais de inspeção para medição da dureza, conforme o processo de brasagem. O material utilizado na fabricação das luvas é uma liga de 16MnCr5, cementada e temperada com dureza de  $750 \pm 50$  HV10 após tratamento térmico. Já o tambor de embreagem é uma liga de 25CrMo4 semelhante a DIN EN 1008331, SAE 4130 ou ASTM A 322390b. Possui tamanho de grão austenítico menor que 8, conforme DIN EN ISO 643, e inclusões não metálicas conforme DIN 50602, além de dureza especificada entre 400 a 680 HV3 após tratamento térmico e com carbonetação máxima permitida de  $0,15 \mu\text{m}$ . Ambos materiais de luva e tambor de embreagem estão conforme normativas da empresa SWN 62405-01 e SWN 31155-03, respectivamente.

Em seguida, foram pesquisadas alternativas para o processo de brasagem, e dentre as opções possíveis, soldagem a LASER foi a mais atrativa por já possuir o equipamento necessário para realização do processo no parque fabril, e ainda com capacidade disponível para absorver toda

a produção de tambores de embreagem, embora a máquina seja usada principalmente para corte. Deste modo, o estudo busca responder quais seriam as combinações de parâmetros adequadas para a produção de cordão de solda na junta tambor-luva e que atenda as especificações.

### 3.1 APRESENTAÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

Foram, então, realizados cordões de solda autógenos, ou seja, sem metal de adição, sobre a junta montada sob interferência entre luva e tambor de embreagem. Para produção das amostras estudadas, foi utilizada a máquina de solda e corte a LASER, com ressonador da marca TRUMPF®, modelo TLF3000t. Esse tipo de ressonador possui como meio ativo o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), sendo adicionados os gases hélio (He) e nitrogênio (N<sub>2</sub>), conforme Figura 6.

Figura 6 – LAS001 com ressonador TLF 3000t.



Visando um maior entendimento dos efeitos da variação dos parâmetros da máquina na força de extração da junta soldada e formação de trincas, foram variados os parâmetros independentes: Potência do LASER (Pot), Velocidade de avanço do cabeçote (v) e Distância focal do LASER (D.F.), tendo em vista que são os parâmetros aos quais o operador tem acesso e pode alterar na máquina. Demais parâmetros que tem influência sobre o cordão de solda, como Modo Transversal Eletromagnético, comprimento de onda, refletividade, difusividade térmica, teor de elementos voláteis nos metais, fluxo de gás, entre outros, foram mantidos constantes de uma amostra para a outra.

Os parâmetros controláveis do estudo foram, então, variados em três níveis cada um, de acordo com a metodologia usada no projeto de experimentos. Os limites inferiores e superiores dos parâmetros foram determinados através de ensaios exploratórios, em que amostras foram produzidas com elevada discrepâncias entre os fatores, a fim de encontrar uma condição mínima de formação de um cordão de solda. Através de inspeção visual a olho nu, os parâmetros resultantes dessa restrição nos limites em que houve a formação, aparentemente satisfatória do cordão, sem porosidades superficiais ou mordedura, estão representados na Tabela 1.

Tabela 1 – Níveis dos fatores do projeto de experimento Box-Behnken.

Fatores (Parâmetros independentes)	Notação	Unidade	Níveis dos Parâmetros Independentes		
Níveis Codificados	-	-	Baixo (-1)	Central (0)	Alto (+1)
Potência do LASER	Pot	W	1800,0	2100,0	2400,0
Velocidade de avanço	v	mm/s	16,6	25,0	33,3
Distância focal	D. F.	mm	-3,0	-1,5	0,0

A potência do equipamento é determinada em Watts, a velocidade de avanço do cabeçote LASER em milímetros por segundo e a distância focal em milímetros, em que o valor negativo indica foco abaixo da superfície da peça.

Após a determinação dos níveis de cada parâmetro independente apresentados na Tabela 1, realizou-se a etapa de planejamento experimental mediante a aplicação do projeto de experimento Box-Behnken. Para isso, foi utilizado o software Minitab<sup>®</sup> para gerar as quinze combinações de parâmetros na sequência aleatória para realização dos cordões de solda, conforme Apêndice A.

O ponto central das amostras, nas quais todos os parâmetros encontram-se no nível intermediário, conforme a matriz experimental de Box-Behnken, é necessário para o termo de erro do experimento. Além das 15 amostras, foram geradas uma réplica de cada combinação, pois uma das amostras é destinada ao ensaio de extração, enquanto a outra à micrografia. Anteriormente a esses testes, todas as peças passam pelo teste com líquido penetrante a fim de verificar a formação de trincas.

Logo após a realização da soldagem a LASER, todas as amostras produzidas foram destinadas a um forno de revenimento da marca AICHELIN<sup>®</sup> durante uma hora à temperatura de 600 °C e resfriamento no interior do forno, conforme normativa que rege o componente na empresa. O alívio de tensões na junta foi realizado, a fim de evitar o aparecimento de trincas na peça.

Posteriormente, uma peça de cada combinação de parâmetros foi destinada ao laboratório de ensaios mecânicos da empresa para verificar as forças de extração, o equipamento utilizado é da marca INSTRON<sup>®</sup> série 23, com célula de carga da série 2530 para até 20 kN. Enquanto a réplica de cada uma delas foi cortada e lixadas até obter uma superfície adequada para realizar o ataque químico segundo a norma ASTM E3. De acordo com a metodologia descrita no ASM HANDBOOK (2004) e a norma ASTM E340, o ataque químico foi realizado em todas as amostras com o reativo Keller composto por H<sub>2</sub>O, HCl, NHO<sub>3</sub> e HF. Foram realizadas as medições de largura e profundidade do cordão de solda com o auxílio do software livre Image J<sup>®</sup>.

## 4. RESULTADOS

O presente trabalho busca analisar a combinação dos parâmetros de soldagem que proporcionam juntas soldadas isentas de trincas, uma resistência mecânica superior ao mínimo especificado e as microestruturas resultantes do processo de soldagem a LASER nas juntas entre tambor de embreagem e luva.

### 4.1 ANÁLISE DE TRINCAS

Após o processo de soldagem e alívio de tensões, todas as peças passaram pela análise com líquido penetrante, a fim de verificar a existência de trincas que pudessem vir a comprometer a resistência mecânica da solda e conseqüentemente o não atingimento dos requisitos normativos. O teste consiste em mergulhar as peças em líquido penetrante VP-30 da marca METALCHEK<sup>®</sup>, por aproximadamente 5 minutos e, após esse período, as mesmas devem ser lavadas com jato d'água fraco para remoção do excesso de líquido. Em seguida, elas são destinadas a um forno a 180 °C por 10 minutos para a remoção de umidade. Por fim, é utilizado um revelador D-70 da mesma marca, o qual reage quimicamente com a peça, conforme pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Ensaio de líquidos penetrante.

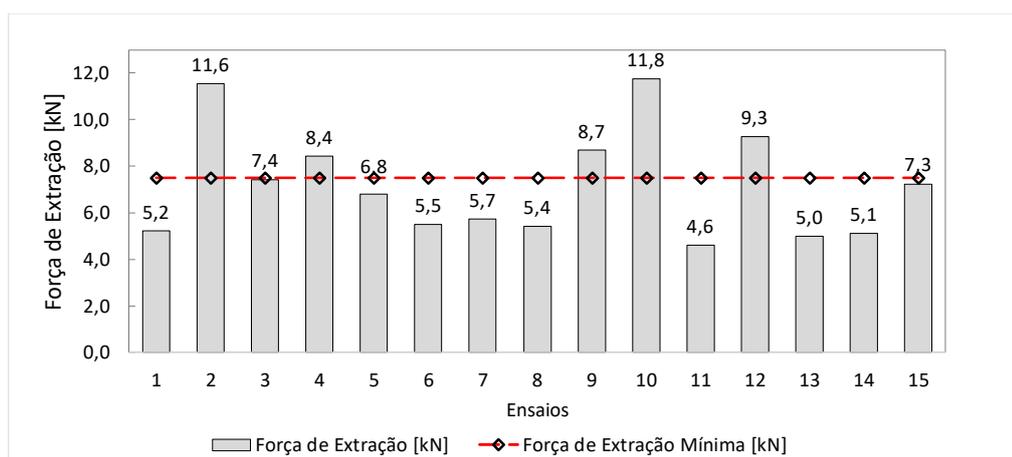


O teste com líquido penetrante auxilia à inspeção visual em juntas em que é difícil distinguir a existência de trincas. O revelador ressalta a existência delas através do contraste entre a cor branca, deixada por ele, e a cor avermelhada que havia penetrado na trinca. Através da Figura 7, pode observar-se que apenas a amostra 3 e 5 apresentaram trinca em uma das réplicas.

#### 4.2 ANÁLISE DA FORÇA DE EXTRAÇÃO

Após a análise de trincas, um dos grupos de corpos de prova foi destinado ao ensaio de extração, segundo a normativa da empresa SWN 43164-01, Teste das luvas. A normativa pede que sejam utilizadas 3 amostras com mesmas condições, o que não foi possível seguir devido a disponibilidade no número de corpos de prova, tendo em vista que foram realizadas apenas uma réplica de cada uma das 15 peças. Segundo a norma SWN 62405-01, a força de extração da luva para implementos é obtida através da potência da máquina, que no caso da FS 85 é 0,95 kW, o que representa 7,5 kN no teste de extração. As peças que foram, então, ensaiadas estão representadas na Figura 8 com seus valores máximos de carga.

Figura 8 – Resultados da Força de Extração.



É possível notar que apenas 5 dos 15 corpos de prova ultrapassaram o valor de carga mínima solicitado em norma, e os ensaios 1, 6 e 13, que representam o ponto central da combinação de parâmetros, apresentou repetitividade na resposta do ensaio. Foi avaliada a força de extração, a fim de entender estatisticamente as influências dos parâmetros estudados (Pot,  $v$ , D. F.) em relação à variável resposta Força de Extração. Primeiramente realizou-se uma análise de

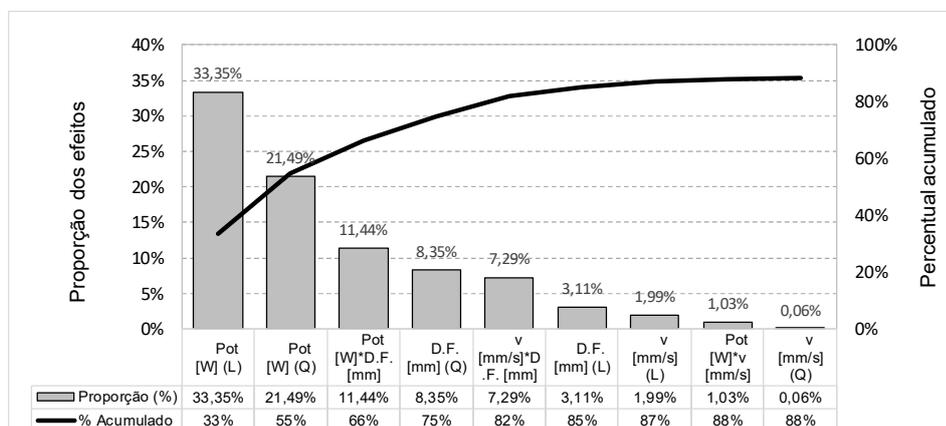
variância (ANOVA), a qual avalia a significância dos parâmetros, considerando os efeitos lineares (L) e quadráticos (Q) da equação de regressão (Equação 1), e suas interações (apenas lineares). Por meio dos termos: graus de liberdade (GL), e a soma dos quadrados (SQ), realiza-se o cálculo do quadrado médio (QM), o qual é a divisão de SQ sobre GL para cada um dos termos. Calcula-se o termo F, o qual é a divisão entre os quadrados médios do termo e os quadrados médios do resíduo, o erro experimental. Na Tabela 3 apresenta-se a tabela ANOVA para a Força de Extração.

Tabela 3 – Análise de Variância (ANOVA) Força [kN] versus Pot[W], v[mm/s] e D.F.[mm].

Fonte	GL	SQ Seq	SQ(Aj.)	QM(Aj.)	F	Valor-P	Contribuição
Modelo	9	67,0447	67,0447	7,4494	4,11	0,067	88,10%
<b>Pot [W] (L)</b>	<b>1</b>	<b>25,3828</b>	<b>22,5040</b>	<b>22,5040</b>	<b>12,43</b>	<b>0,017</b>	<b>33,35%</b>
v [mm/s] (L)	1	1,5138	1,5902	1,5902	0,88	0,392	1,99%
<b>D.F. [mm] (L)</b>	<b>1</b>	<b>2,3653</b>	<b>18,4511</b>	<b>18,4511</b>	<b>10,19</b>	<b>0,024</b>	<b>3,11%</b>
<b>Pot [W] (Q)</b>	<b>1</b>	<b>16,3550</b>	<b>17,8979</b>	<b>17,8979</b>	<b>9,88</b>	<b>0,026</b>	<b>21,49%</b>
v [mm/s] (Q)	1	0,0435	0,1615	0,1615	0,09	0,777	0,06%
D.F. [mm] (Q)	1	6,3525	6,3525	6,3525	3,51	0,120	8,35%
Pot [W]*v [mm/s]	1	0,7832	0,7832	0,7832	0,43	0,540	1,03%
Pot [W]*D.F. [mm]	1	8,7025	8,7025	8,7025	4,81	0,080	11,44%
v [mm/s]*D.F. [mm]	1	5,5460	5,5460	5,5460	3,06	0,141	7,29%
Erro	5	9,0543	9,0543	1,8109			11,90%
Total	14	76,0990					100,00%

O valor-P representa o ponto da distribuição-F que o termo se encontra estatisticamente, em outras palavras, relaciona a diferença significativa deste fator estudado concluindo se ele é significativo ou não para a variável resposta. Se o valor-P for menor que 0,05 o efeito do parâmetro ou interação é significativo sobre a Força. Na prática, considera-se efeito de significância moderado para  $0,05 < P \leq 0,10$ . Conforme destacado na Tabela 3, os fatores significativos para a força de extração são efeitos linear e quadrático da potência e linear da distância focal. Porém, nenhuma interação entre esses fatores é significativa. Na Figura 9 está representada a proporção que cada fator representa em relação ao total dos efeitos. No Apêndice B.1, está representado o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados e observa-se que o parâmetro Potência linear e quadrático são significativos, assim como a distância focal (D.F.) sobre a Força de Extração.

Figura 9 – Proporção dos efeitos por fator para a Força.



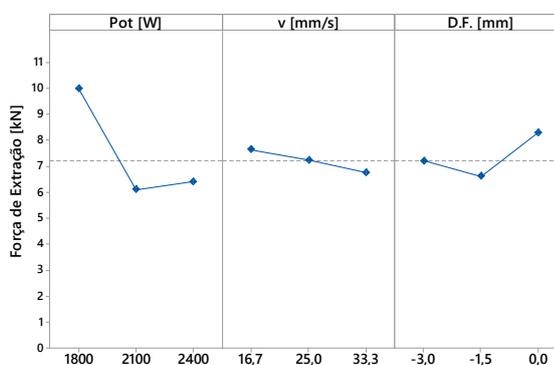
Mediante o modelo de regressão polinomial de segundo grau é possível determinar uma relação numérica entre a Força de Extração e os parâmetros independentes. O objetivo do uso da metodologia da superfície de resposta (MSR) é desenvolver um modelo matemático da superfície de resposta de segunda ordem com o melhor ajuste e encontrar o conjunto ótimo de parâmetros experimentais que produzam um valor máximo ou mínimo de resposta. Com base nos resultados obtidos a partir do projeto de experimentos Box-Behnken, um modelo de regressão de segunda ordem para a força de extração foi desenvolvido em termos dos valores reais (não-codificado) dos fatores e interações avaliados, conforme Equação 2.

$$F = 153,80 - 1,18.10^{-1}.Pot - 7,16.10^{-1}.v + 11,35.DF + 2,40.10^{-5}.Pot^2 + 3,00.10^{-3}.v^2 + 5,83.10^{-1}.DF^2 + 1,77.10^{-4}.Pot.v - 3,28.10^{-3}.Pot.DF - 9,42.10^{-2}.v.DF \quad (2)$$

Essa influência da potência também é comprovada no gráfico dos efeitos principais, Figura 10, onde há uma grande variação na força de extração quando alterada a potência da máquina de solda do seu nível inferior para o central. A relação de distância focal com a força de extração apresenta sua maior contribuição quando o LASER é focado sobre a superfície da peça. Já a variação na velocidade apresenta pequena contribuição para a variação da força.

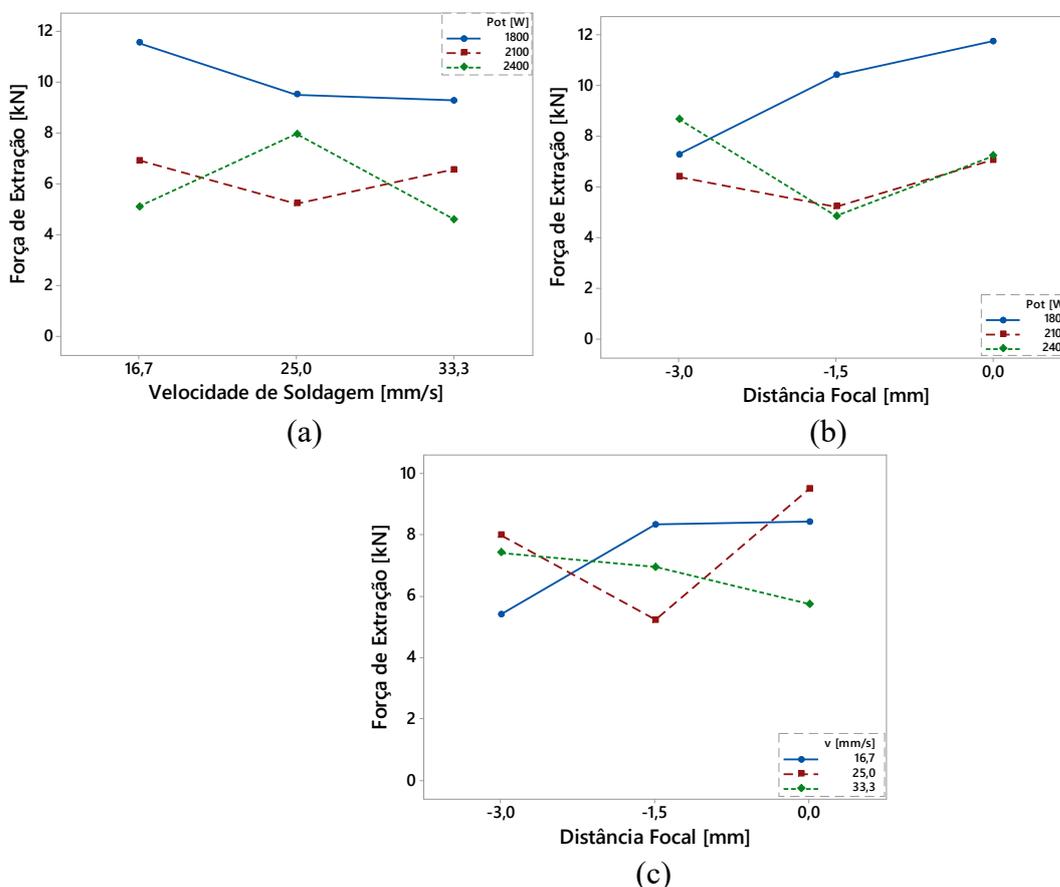
A redução da potência causa o aumento na média das forças de extração. É importante notar que na avaliação do efeito individual de cada parâmetro deve se considerar todos os valores da força de cada ensaio do projeto de experimento, no total quinze. Desse modo, se define a média das forças para os níveis apenas do parâmetro analisado

Figura 10 – Efeitos principais da Força de Extração[kN].



Aliado à informação da Figura 10, em que estão representados os efeitos principais, a interação de dois parâmetros pode ser observada na Figura 11.

Figura 11 – Gráfico de interação dos fatores sobre a Força de Extração em relação a Velocidade de Soldagem e Potência (a); Força de Extração em relação a Distância Focal e Potência (b); Força de Extração em relação a Distância Focal e Velocidade de Soldagem (c).

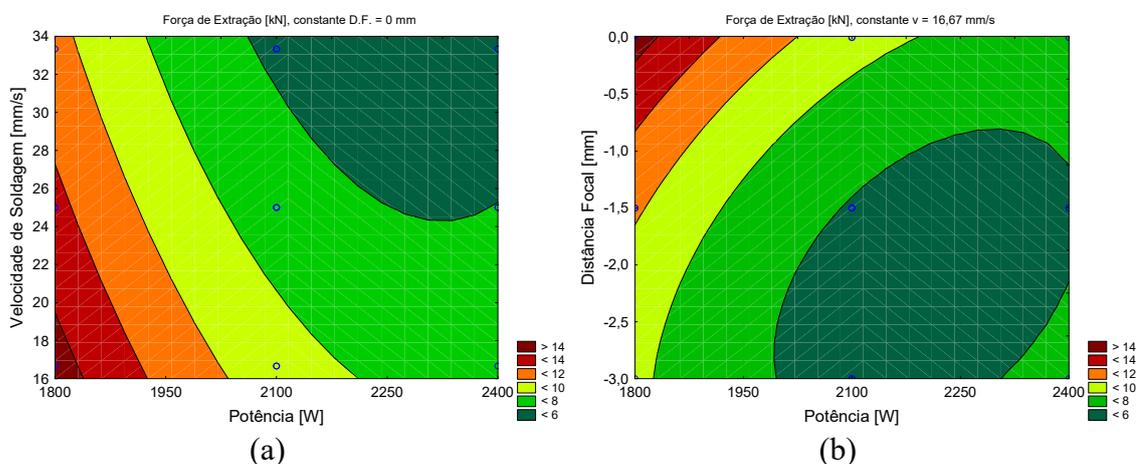


Cada uma das curvas da Figura 11 mostram um valor fixo para um dos parâmetros ao longo da trajetória versus os parâmetros relacionados com a Força de Extração. Assim, a significância das interações determinada pela ANOVA (Tabela 3) pode ser comprovada. Graficamente a interação é significativa quando há cruzamentos entre as linhas gráficas dos diferentes níveis de algum fator, o que não ocorre na Figura 11 (a), mostrando que convém usar a potência no valor mínimo (1800 W), independentemente do valor de velocidade, pois a força resultante no ensaio de extração é sempre maior.

A partir da equação de regressão, e com auxílio do software Minitab<sup>®</sup>, é possível criar a superfície de resposta. Na Figura 12 (a) observa-se que conforme diminuem a potência e a velocidade de soldagem, a média das forças de extração da junta aumenta, mantendo constante a distância focal igual a zero. É possível obter a média das forças superior aos 8 kN, mediante o ajuste da potência inferior aos 2100 W e a redução da velocidade de soldagem.

A Figura 12 (b) mostra o gráfico de contorno da média das forças de extração em função dos parâmetros distância focal e potência, mantendo constante a velocidade de soldagem em 16,67 mm/s. Para uma potência mínima e ajuste da distância focal próxima da superfície, pode obter-se os maiores valores da força de extração.

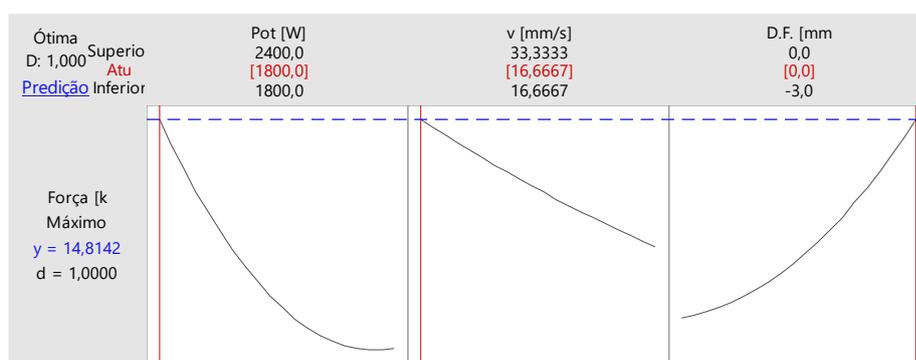
Figura 12 –Gráfico de contorno da média das forças de extração em função dos parâmetros  $v$  e Pot, mantendo constante D.F. = 0 [mm] (a). Gráfico de contorno da média das forças de extração em função dos parâmetros D.F. e Pot, mantendo constante  $v = 16,67$  [mm/s] (b).



Já a Figura do Apêndice B.2, apresenta a relação entre os valores estimados, a partir da equação de regressão, e os valores observados. Quanto mais próximos estiverem os pontos da reta, significa que melhor é a estimativa da média das forças de extração usando o modelo de regressão em função dos parâmetros analisados.

A Figura 13 mostra os valores dos parâmetros de controle que maximizam a média das forças de extração, o perfil dos valores estimados e a desejabilidade. O valor máximo estimado da média força de extração é de 14,8 kN para seguintes parâmetros: Pot = 1800 [W],  $v = 16,67$  [mm/s] e D.F. = 0 [mm].

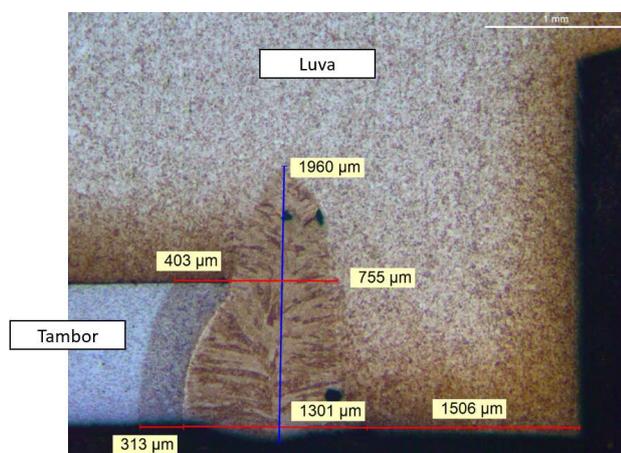
Figura 13 – Valor Máximo Estimado da Força de Extração.



### 4.3 MICROGRAFIA

A micrografia consiste na análise da secção da junta devidamente polida e atacada pelo reagente. Mesmo no corpo de prova que apresentou maior resistência mecânica (CP 7), observa-se a presença defeitos, poros ou vazios após o resfriamento da poça de fusão, bem como as dimensões de largura e profundidade do cordão de solda. Mostra, ainda, a zona afetada pelo calor (ZAC), conforme apresenta a Figura 14. Microestruturas de outros corpos de prova podem ser observadas no Apêndice C.

Figura 14 – Micrografia do CP 07. Cordão de solda obtido com Pot = 2100 [W], v = 33,33 [mm/s], D.F. = 0,0 mm, Força = 5,74 [kN].



Para ter pleno conhecimento da microestrutura resultante do processo de soldagem a LASER, é necessário realizar o ensaio de dureza para relacionar a imagem aos diagramas de transformação dos materiais envolvidos. Porém, há provável formação de martensita na junta devido ao elevado conteúdo de carbono existente na superfície dos materiais, tendo em vista que a luva é fornecida cementada. O aprofundamento da análise de micrografias e durezas deverá ser realizado em trabalhos subsequentes no projeto de internalização da fabricação do componente, para vir ao pleno entendimento da união entre tambor de embreagem e luva.

## 5. CONCLUSÃO

Constantemente são propostas novas alternativas aos processos produtivos com o objetivo de redução de custo para os componentes. Trabalhos como este servem de base para projetos de internalização quando estes apresentam viabilidade técnica e econômica.

Esse trabalho é o passo inicial na parte técnica, onde primeiramente é necessário entender a influência dos parâmetros controláveis no equipamento capaz de substituir o atual processo de soldagem. Pode-se observar a relação entre parâmetros independentes do processo de soldagem a LASER dos tambores de embreagem com a resposta na força de extração da luva, bem como os valores que a maximizam. Foi evidenciada a influência da potência sobre a resposta, e que a variação na velocidade e a interação entre os fatores possui pequena contribuição sobre a força de extração.

O projeto de experimentos Box-Behnken é de grande valia para o entendimento dos efeitos principais e interações dos parâmetros, pois a partir do polinômio de regressão pode ser gerada a superfície de resposta. É, ainda, uma metodologia científica confiável de baixo custo, por utilizar número reduzido de amostras, e que proporciona um embasamento técnico e estatístico em processos aos quais não há pleno conhecimento. Posteriormente a esse trabalho, devem ser feitas as análises de micro durezas na junta, seguindo as normativas da empresa, bem como o cálculo refinado de viabilidade econômica para dar segmento no projeto de internalização da produção de tambores de embreagem.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ABNT. **Informação e documentação — Trabalhos acadêmicos — Apresentação - ABNT NBR 14724 2011**, 2011.
- ASM. **Metals Handbook - Welding, Brazing and Soldering**. E. U. A.: ASM, ISBN 9780871703828, 1993.
- AWS; **“Welding Handbook, Welding Processes”**, Part 1, 9th ed., Miami-USA. American Welding Society, v.2, 2004.
- BAUMGAERTNER FILHO, A. J. **Análise dos parâmetros da polaridade negativa na curva de corrente de soldagem MIG/MAG polaridade variável aplicados à soldagem para revestimento**. 2017.
- BOX, G.E.P.; Behnken, D.W.; **“Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables**, *Technometrics* 2 (4) 455–475, 1960.
- BOX, G. E. P., & DRAPER, N. R.; **“Empirical Model Building and Response Surfaces”**, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1987.
- FERREIRA, S. L. C.; BRUNS, R. E; FERREIRA, H. S.; MATOS, G. D.; DAVID, J. M.; BRANDÃO, G. C.; et al.; **“Box–Behnken design: An Alternative for the Optimization of Analytical Methods”**, *Analytica Chimica Acta*, 597(2), 179–186, 2007.
- KALPAKJIAN, S. & SCHIMD, S. **Manufacturing Engineering and Technology**, 4 ed., Ed. Prentice Hall, 2001.
- KATAYAMA S., KAWAHITO A Y., MIZUTANIA M. **Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting welding penetration and welding defects**. *Physics Procedia*. 2010, p 9.
- MACHADO, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: Processos**. Porto Alegre: s.n., 1996
- MONTGOMERY, D. C.; **“Design and Analysis of Experiments”**, USA: John Wiley & Sons, Inc., 8th ed. 2013.
- MYERS, R. H., & MONTGOMERY, D. C.; **“Response Surface Methodology”**, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.
- OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C.; **“Engenharia de Soldagem e Aplicações”**, 1ª Ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, p 461. 1982.
- SILVEIRA, G. V. **Efeito da alteração dos parâmetros do processo LASER sobre a geometria do cordão de solda**. 2012

**APÊNDICE A – PROJETO DE EXPERIMENTO BOX-BEHNKEN APLICADO A  
SOLDAGEM A LASER EM TAMBORES DE EMBREAGEM.**

	Ordem Ens	Corpo de Prova	Potência [W]	Velocidade [mm/s]	Dist. Focal [mm]	Força [kN]
P. Central	1	13	2100,00	25,00	-1,50	5,21
	2	1	1800,00	16,66	-1,50	11,57
	3	10	2100,00	33,33	-3,00	7,43
	4	11	2100,00	16,66	0,00	8,44
	5	5	1800,00	25,00	-3,00	6,80
P. Central	6	15	2100,00	25,00	-1,50	5,50
	7	12	2100,00	33,33	0,00	5,74
	8	9	2100,00	16,66	-3,00	5,42
	9	6	2400,00	25,00	-3,00	8,69
	10	7	1800,00	25,00	0,00	11,76
	11	4	2400,00	33,33	-1,50	4,61
	12	3	1800,00	33,33	-1,50	9,29
P. Central	13	14	2100,00	25,00	-1,50	5,00
	14	2	2400,00	16,66	-1,50	5,12
	15	8	2400,00	25,00	0,00	7,29

## APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA.

Figura B.1 – Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados.

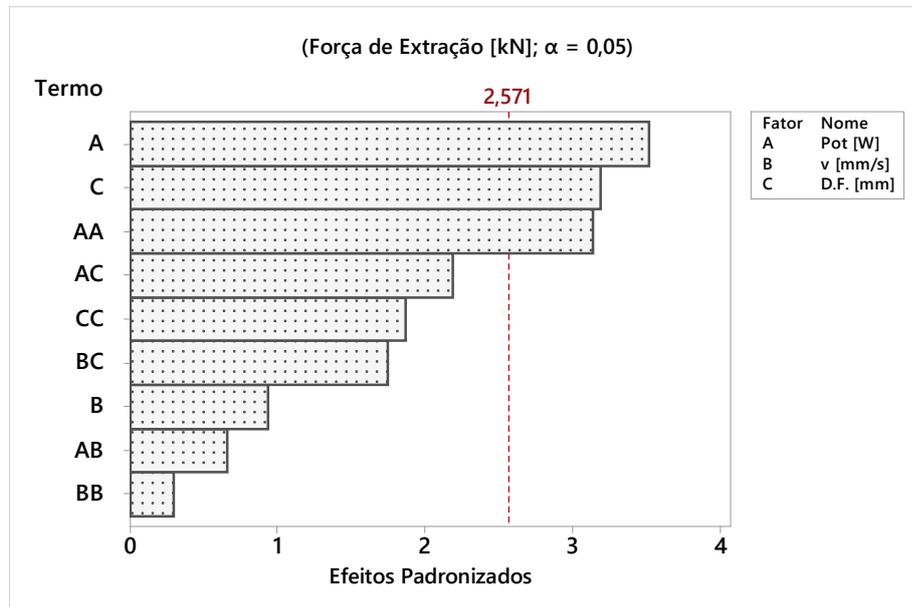
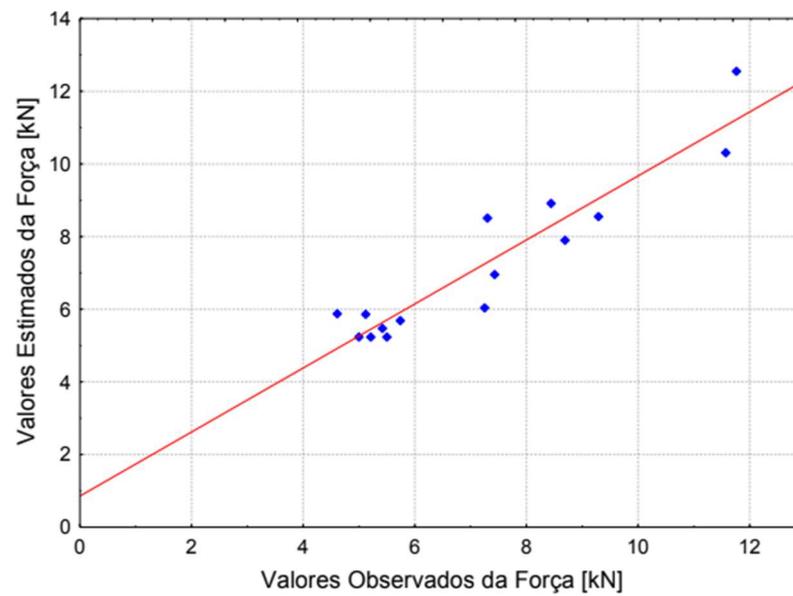


Figura B.2 – Valores Observados e Estimados da Força de Extração.



### APÊNDICE C – MICROESTRUTURAS.

Figura C.1 – Micrografia do CP 01. Cordão de solda obtido com Pot = 2100 [W],  $v = 25,0$  [mm/s], D.F. = -1,50 mm, Força = 5,21 [kN].

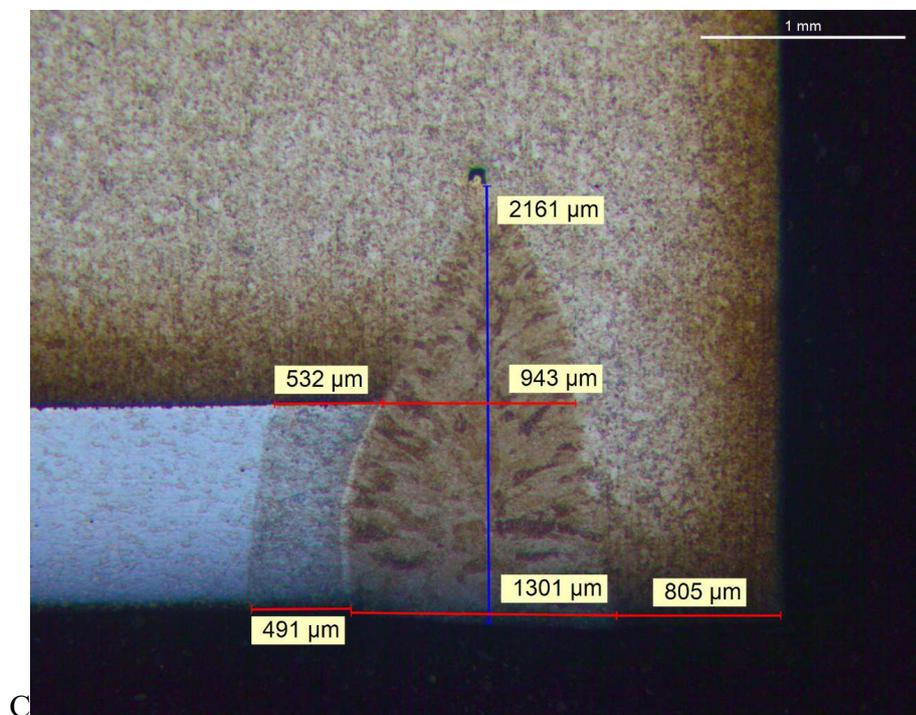


Figura C.2 – Micrografia do CP 05. Cordão de solda obtido com Pot = 1800 [W],  $v = 25,0$  [mm/s], D.F. = -3,00 mm, Força = 6,80 [kN].

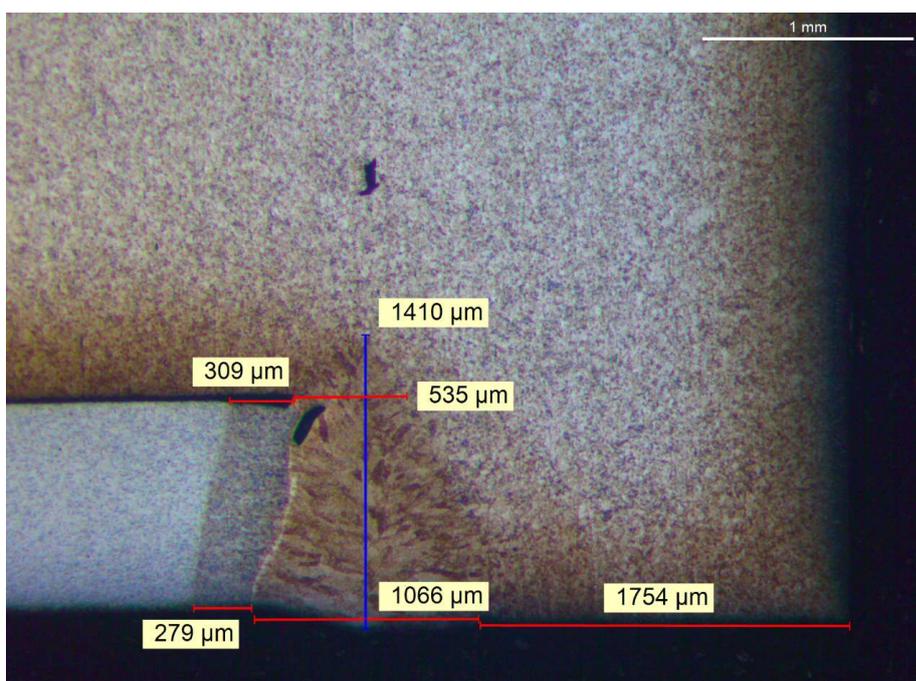


Figura C.3 – Micrografia do CP 05 (Presença de trinca). Cordão de solda obtido com Pot = 1800 [W],  $v = 25,0$  [mm/s], D.F. = -3,00 mm, Força = 6,80 [kN].

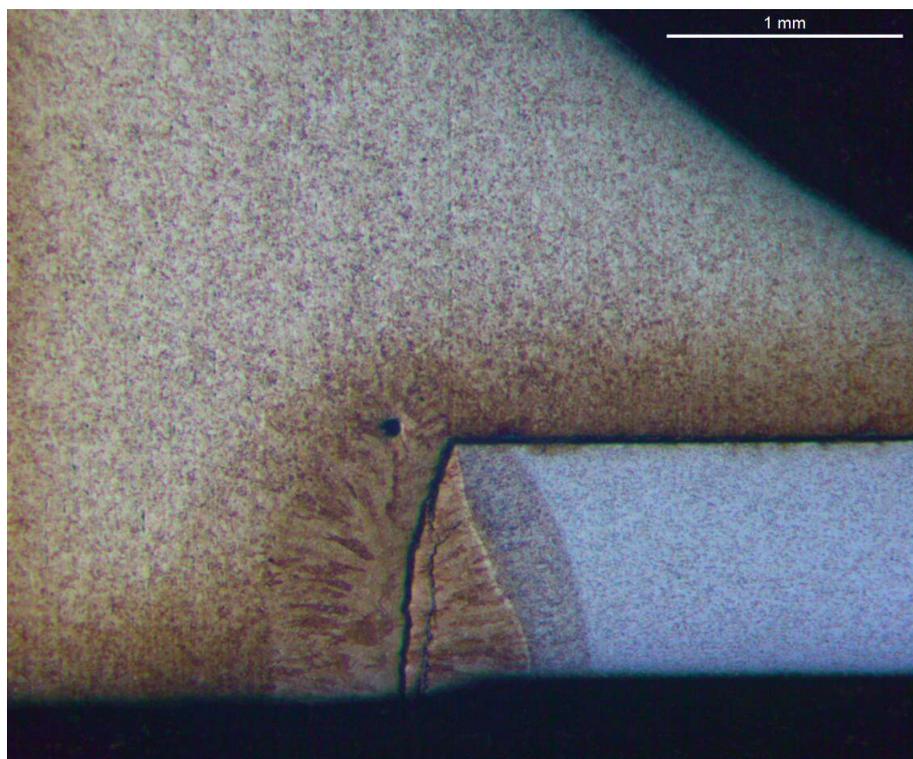


Figura C.4 – Micrografia do CP 14 (Ponto Central). Cordão de solda obtido com Pot = 2400 [W],  $v = 16,67$  [mm/s], D.F. = -1,50 mm, Força = 5,12 [kN].

