

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO - MESTRADO PROFISSIONAL

Rogério Pasinato

CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE FURAÇÃO POR FRICÇÃO DO
AÇO LN 700

Passo Fundo

2015

Rogério Pasinato

**CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE FURAÇÃO POR FRICÇÃO DO
AÇO LN 700**

Passo Fundo

2015

Rogério Pasinato

**CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE FURAÇÃO POR FRICÇÃO DO
AÇO LN 700**

Orientador: Prof. Dr. Charles Leonardo Israel

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo
2015

Rogério Pasinato

**CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE FURAÇÃO POR FRICÇÃO DO
AÇO LN 700**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade de Passo Fundo – UPF, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 01 de junho de 2015.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor Charles Leonardo Israel

Orientador e Coordenador do PPGPPF

Professor Doutor Fabiano Dornelles Ramos

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - IFRS

Professor Doutor José Antonio Portella

Universidade de Passo Fundo - PPGPPF

Professor Doutor Luiz Airton Consalder

Universidade de Passo Fundo - PPGPPF

Passo Fundo

2015

*Dedico este trabalho à minha esposa Sirlanda
que sempre apoiou minhas conquistas e
desafios.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo sopro da vida que me assegurou chegar até aqui. E pelas inúmeras dádivas conquistadas no dia a dia do viver: as angústias, as perturbações e até as lágrimas que demonstram ainda, possuir uma condição de humanidade em meus atos.

Aos valorosos mestres e doutores que encaminharam meus estudos e incursões no mundo do conhecimento, sem os quais não haveria esta produção.

Aos amigos e colegas que entenderam minhas ausências, minhas crises existenciais e meus momentos de estresse e indignação frente a discussões propostas.

Ao meu colega de mestrado Fabrício Páris que por inúmeras vezes viajou comigo e estudou nesta ambição profissional.

Ao FUMDES, programa de incentivo a educação oferecido pela Secretaria de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado de Santa Catarina, pelo apoio destinado a realização deste estudo.

A meu professor orientador Dr. Charles Leonardo Israel que sempre motivou e mostrou a importância de fazer um trabalho coeso nesta etapa da minha vida acadêmica.

A minha esposa Sirlanda que muitas vezes sentiu as agruras e o desligamento a que muitas vezes me outorguei em nome de bem maior.

Aos meus pais Lino e Santa Paulina Pasinato que todas as viagens para Passo Fundo, sempre ofereceram o alimento para continuar a viagem.

A todos, que de alguma maneira contribuíram para que esse projeto de vida pudesse acontecer.

*“Um homem não é nada além daquilo que a
educação faz dele”.*
Immanuel Kant

RESUMO

A furação por fricção tem por finalidade a execução de buchas escoadas sem a remoção de cavacos por meio da ação de uma ferramenta rotativa que promove o aquecimento do material e sua deformação. A aplicação deste tipo de furação é usada em chapas finas em substituição de componentes com porcas soldadas, rebites e em peças com complexidade que dificultam o acesso com ferramentas para a fixação. Neste estudo é apresentado a avaliação do comportamento do aço ARBL LN 700 submetido à furação por fricção a seco, realizado num perfil retangular com dimensões de 100 x 40 x 4mm sendo furado com uma ferramenta fabricada de metal duro UK 40, com revestimento de nitreto de titânio, com diâmetro do furo a ser obtida de 10,9mm. Na revisão bibliográfica possibilitou avaliar o material para fabricação da ferramenta, sua geometria e os parâmetros a serem usados na furação baseados em estudos já realizados em outros tipos de materiais. Para os ensaios, dois grupos com parâmetros de rotação e avanço foram definidos para comparar os resultados da furação, caracterizados como grupo 1 e grupo 2. Os ensaios de furação foram realizados em centro de usinagem CNC. Com a furação realizada foram avaliados resultados de circularidade, altura da bucha escoada, região afetada pela temperatura, microdureza do material, comprimento da bucha escoada e tensão residual resultante dos ensaios de furação por fricção. Para avaliar os resultados foi realizado análise do teste “t”, com grau de confiabilidade de 95%. Os resultados mostraram que os parâmetros usados no grupo 2 apresentaram melhor comportamento do aço LN 700 na caracterização da furação por fricção.

Palavras-chave: Furação por fricção. Parâmetros de furação. Tensão residual. Aço ARBL LN 700.

ABSTRACT

The drilling friction aims at implementing bushings disposed without chip removal through the action of a rotary tool which promotes the heating of the material and its deformation. The application of this type of drilling is used in thin sheets to replace components with weld nuts, rivets and parts complexity that hinder access to tools for fixing. This study presents the evaluation of steel behavior HSLA LN 700 subjected to dry friction drilling, carried out in a rectangular shape with dimensions of 100 x 40 x 4mm being stuck with a manufactured tool of carbide UK 40 with nitride coating titanium, with hole diameter being obtained from 10,9mm. The literature review allowed us to evaluate the material for tool manufacturing, its geometry and parameters to be used in drilling based on previous studies in other types of materials. For the tests, two groups of rotation and advancement parameters are set to compare the results of drilling, characterized as groups 1 and 2. The drilling tests were performed in CNC machining center. With the drilling performed were evaluated results of circularity, height drained bushing region affected by temperature, hardness of the material, length of the sleeve and drained resulting residual stress of friction drilling tests. To assess the results was carried out test analysis "t", with 95% degree of reliability. The results showed that the parameters used in group 2 had better LN 700 steel behavior in the characterization of friction drilling.

Keywords: drilling friction. Drilling parameters. Residual tension. HSLA steel LN 700.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1 | Processos de furação por fricção | 19 |
| Figura 2 | Geometria de ferramenta de furação por fricção | 21 |
| Figura 3 | Ferramenta furação fricção | 21 |
| Figura 4 | Geometria da rebarba obtida na furação | 23 |
| Figura 5 | Microestrutura do aço <i>Dual Phase</i> 800 com estrutura já atacada pelo calor na região do furo (a), Estrutura do material base (b). | 24 |
| Figura 6 | Etapas do processo de furação | 25 |
| Figura 7 | Relação entre temperatura, tensão e microestrutura | 30 |
| Figura 8 | Distâncias interplanares de um corpo sem tensões residuais | 31 |
| Figura 9 | Espelhamento e difração em um arranjo cristalino | 32 |
| Figura 10 | Determinação da largura e meia altura em um pico de difração | 33 |
| Figura 11 | Ferramenta para furação | 35 |
| Figura 12 | Etapas do processo de furação por fricção | 36 |
| Figura 13 | Etapas da furação por fricção. a) aproximação da ferramenta; b) contato entre ferramenta e peça; c) início da penetração da ferramenta | 38 |
| Figura 14 | Etapas da furação por fricção: d) penetração do cone, e) penetração do corpo, f) formação da anilha, g) recuo da ferramenta | 39 |
| Figura 15 | a) Ferramenta de furação, b) peça furada por fricção | 39 |
| Figura 16 | Distâncias definidas para coleta de dados circularidade, cilindricidade e rugosidade em amostras furadas | 40 |
| Figura 17 | Bucha escoada | 41 |
| Figura 18 | Pontos de medição de microdureza | 42 |
| Figura 19 | Amostra para determinação de região afetada pela temperatura | 43 |
| Figura 20 | Sistema de fixação de peça para ensaio de raios X | 44 |
| Figura 21 | Bucha escoada | 49 |
| Figura 22 | Distância afetada pela temperatura amostra 4 | 53 |
| Figura 23 | Interface Metal base (50x) | 55 |
| Figura 24 | Interface Metal base (500x) | 55 |
| Figura 25 | Interface Região afetada (50x) | 55 |
| Figura 26 | Interface Região afetada (500x) | 55 |
| Figura 27 | Interface Rebarba (50x) | 56 |
| Figura 28 | Interface Rebarba (500x) | 56 |
| Figura 29 | Perfil de furação (aplicação 30x) | 62 |
| Figura 30 | Região de superfícies do furo (ampliação 300x) | 63 |
| Figura 31 | Superfície do furo resultante na furação (ampliação 4000x) | 64 |
| Figura 32 | Sequência definida para análise tensão residual | 74 |
| Figura 33 | Sequência definida para análise tensão residual | 78 |

LISTA DE QUADROS

| | | |
|----------|---|----|
| Quadro 1 | Classificação dos aços quanto as resistências em função do limite de escoamento | 27 |
| Quadro 2 | Composição química do aço LN 700 | 28 |
| Quadro 3 | Parâmetros definidos para o estudo da caracterização | 36 |
| Quadro 4 | Diâmetros dos furos resultantes da furação | 46 |
| Quadro 5 | Comprimento das buchas escoadas de cada grupo de furação | 48 |
| Quadro 6 | Distâncias resultantes pela ação da temperatura na furação | 53 |
| Quadro 7 | Resultados de rugosidade Rz | 56 |
| Quadro 8 | Resultados de rugosidade Rz | 57 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | | |
|------------|---|----|
| Gráfico 1 | Comparação de diâmetros dos furos entre grupos 1 e 2 | 47 |
| Gráfico 2 | Comprimento das buchas escoadas | 48 |
| Gráfico 3 | Microdureza obtida na região metal base, região afetada e bucha escoada grupo 1 | 50 |
| Gráfico 4 | Microdureza obtida na região metal base, região afetada e bucha escoada grupo 2 | 51 |
| Gráfico 5 | Comparação de microdureza entre grupos | 52 |
| Gráfico 6 | Distância afetada pela temperatura na furação | 54 |
| Gráfico 7 | Resultados de média de rugosidade grupo 1 | 57 |
| Gráfico 8 | Resultados de média de rugosidade grupo 2 | 58 |
| Gráfico 9 | Níveis de rugosidade | 58 |
| Gráfico 10 | Tensão residual metal base | 59 |
| Gráfico 11 | Média de tensão residual na furação do grupo 1 | 60 |
| Gráfico 12 | Média de tensão residual na furação do grupo 2 | 61 |
| Gráfico 13 | Resultado tensão residual Metal Base | 73 |
| Gráfico 14 | Resultado tensão residual furo 1 Grupo 1 | 75 |
| Gráfico 15 | Resultado tensão residual furo 2 grupo 1 | 76 |
| Gráfico 16 | Resultado tensão residual furo 3 grupo 1 | 76 |
| Gráfico 17 | Resultado tensão residual furo 4 grupo 1 | 77 |
| Gráfico 18 | Resultado tensão residual furo 1 grupo 2 | 79 |
| Gráfico 19 | Resultado tensão residual furo 2 grupo 2 | 80 |
| Gráfico 20 | Resultado tensão residual furo 3 grupo 2 | 81 |
| Gráfico 21 | Resultado tensão residual furo 4 grupo 2 | 82 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabela 1 | Resultados de microdureza obtidos com parâmetros grupo 1 | 71 |
| Tabela 2 | Resultados de microdureza obtidos com parâmetros grupo 2 | 72 |
| Tabela 3 | Valores tensão residual metal base | 73 |
| Tabela 4 | Valores tensão residual furo 1 grupo 1 | 75 |
| Tabela 5 | Valores tensão residual furo 2 grupo 1 | 76 |
| Tabela 6 | Valores tensão residual furo 3 grupo 1 | 76 |
| Tabela 7 | Valores tensão residual furo 4 grupo 1 | 77 |
| Tabela 8 | Valores tensão residual furo 1 grupo 2 | 79 |
| Tabela 9 | Valores tensão residual furo 2 grupo 2 | 80 |
| Tabela 10 | Valores tensão residual furo 3 grupo 2 | 81 |
| Tabela 11 | Valores tensão residual furo 4 grupo 2 | 82 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|--|
| ABCM | Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas |
| LES | Large Eddy Simulation |
| PROMEC | Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica |
| UFRGS | Universidade Federal do Rio Grande do Sul |

LISTA DE SÍMBOLOS

A Área, m²

c Velocidade da luz, m/s

Re Número de Reynolds $\left[\frac{\rho UL}{\mu} \right]$

*** (Unidades no sistema internacional)**

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 | OBJETIVO GERAL..... | 16 |
| 1.1.1 | Objetivos Específicos | 16 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA | 17 |
| 2.1 | FURAÇÃO POR FRICÇÃO..... | 17 |
| 2.2 | GEOMETRIA DE FERRAMENTAS USADAS NA FURAÇÃO POR FRICÇÃO. 19 | |
| 2.2.1 | Materiais usados para fabricação da ferramenta | 21 |
| 2.3 | MATERIAIS COMUMENTE FURADOS POR FRICÇÃO..... | 22 |
| 2.3.1 | Formação da bucha escoada e anilha | 23 |
| 2.4 | ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS..... | 24 |
| 2.5 | AÇOS DE BAIXA LIGA E ALTA RESISTÊNCIA (ARBL)..... | 25 |
| 2.6 | METALURGIA DO AÇO ARBL LN 700 | 27 |
| 2.7 | TENSÕES RESIDUAIS..... | 28 |
| 2.7.1 | Técnica de medição de tensão residual | 29 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 33 |
| 3.1 | METODOLOGIA | 33 |
| 3.1.1 | Definição do material para fabricação da ferramenta | 33 |
| 3.1.2 | Definição da geometria da ferramenta | 33 |
| 3.1.3 | Critérios para definição dos parâmetros de furação | 34 |
| 3.1.4 | Fluxograma do processo de furação por fricção | 35 |
| 3.1.5 | Máquina usada nos ensaios de furação..... | 36 |
| 3.2 | EXECUÇÃO DA FURAÇÃO POR FRICÇÃO | 36 |
| 3.2.1 | Medição de cilindridade, circularidade e rugosidade nos ensaios..... | 39 |
| 3.2.2 | Comprimento da bucha escoada | 40 |
| 3.2.3 | Determinação de microdureza wickers | 40 |
| 3.2.4 | Região afetada pelo calor | 41 |
| 3.2.5 | Ensaio de tensão residual | 42 |
| 4 | DISCUSSÃO DE RESULTADOS | 45 |
| 4.1 | GEOMETRIA DA FURAÇÃO..... | 45 |
| 4.2 | COMPRIMENTO DA BUCHA ESCOADA..... | 46 |
| 4.3 | ANÁLISE DE MICRODUREZA | 48 |
| 4.4 | REGIÃO AFETADA PELA TEMPERATURA..... | 51 |
| 4.5 | ENSAIOS DE RUGOSIDADE..... | 55 |
| 4.6 | ANÁLISE DE DADOS DE TENSÃO RESIDUAL..... | 58 |
| 4.6.1 | Análise de tensão residual no grupo 1..... | 59 |
| 4.6.2 | Análise de tensão residual no grupo 2..... | 60 |
| 4.7 | RESULTADOS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA | 61 |
| 5 | CONCLUSÃO | 64 |
| 6 | ESTUDOS RELACIONADOS..... | 66 |
| 7 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 67 |
| 8 | ANEXOS..... | 70 |
| 8.1 | ANEXO 1 – TABELA DE DADOS DE MICRODUREZ VICKERS GRUPO 1..... | 70 |
| 8.2 | ANEXO 2 – TABELA DE DADOS DE MICRODUREZA VICKERS GRUPO 2.. | 71 |
| 8.3 | ANEXO 3 – RESULTADOS DE TENSÃO RESIDUAL | 72 |
| 8.4 | ANEXO 4 – RESULTADOS DE TENSÃO RESIDUAL GRUPO 1 | 73 |
| 8.5 | ANEXO 5 – RESULTADO TENSÃO RESIDUAL GRUPO 2 | 77 |

1 INTRODUÇÃO

A furação por fricção é um processo de fabricação que resulta em uma bucha escoada. A furação é feita por uma ferramenta de geometria definida pela dimensão do furo a ser obtida, onde o material deve apresentar alta resistência ao desgaste e calor. A ferramenta rotacionada sobre a peça promove o aquecimento do material na região de trabalho permitindo que ocorra a deformação plástica através do movimento de rotação e avanço.

A aplicação deste processo de furação compõe uma alternativa para substituição de elementos de fixação como porcas soldadas em perfis estruturais, parafusos passantes e rebites, onde os acessos a peças de perfis tubulares ou geometrias complexas dificultam a fixação de componentes, justificando a aplicação em chapas finas.

Em comparação ao processo de furação convencional pode ser considerada inovadora, pois permite ser feita em materiais de diferentes composições, como aço, aço inoxidável, alumínio, ferro fundido. Em materiais especiais como ARBL LN 700, por exemplo, a furação por fricção pode ser aplicada como alternativa para avaliação do comportamento de sua microestrutura, pois é um material que apresenta recristalização quando submetido à mudança de temperatura.

Neste trabalho, realizou-se a avaliação microestrutural do aço LN 700 após a furação por fricção a seco em um perfil com dimensões de 100 x 40 x 4mm, com uma ferramenta de metal duro UK 40, com dimensão dos furos a serem obtidas de 10,9mm. Os ensaios de furação foram realizados em centro de usinagem operado por comando numérico computadorizado (CNC) onde os parâmetros usados para a furação foram divididos em duas situações distintas definidos de grupo 1 e grupo 2.

Na revisão bibliográfica são abordadas considerações quanto à furação por fricção, materiais aplicados para fabricação da ferramenta, geometria, tipo de material a ser furado, métodos utilizados para furação a seco e, por fim, a discussão dos resultados obtidos onde é caracterizado o comportamento da geometria dos furos, circularidade, rugosidade, zona afetada pela temperatura, comprimento da bucha escoada e tensão residual resultante da furação.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este estudo teve como objetivo geral caracterizar o processo de furação por fricção a seco no aço LN700.

1.1.1 **Objetivos Específicos**

- a) Realizar furação por fricção adotando dois grupos para caracterização divididos em Grupo 1 e Grupo 2;
- b) Comparar as dimensões de circularidade e cilindridade dos furos de diâmetro 10,9mm;
- c) Comparar microdureza, rugosidade entre os grupos de furação;
- d) Avaliar tensão residual do material antes e após a furação nos ensaios realizados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 FURAÇÃO POR FRICÇÃO

O processo de furação por fricção é um método em que o calor causado pelo contato de uma ferramenta com geometria definida em rotação e da ação do avanço sobre um material penetra e resulta em um furo cilíndrico com um colar e bucha. Neste processo, ao contrário do tradicional, em que a massa retirada é o cavaco, todo o material extrusado forma a bucha, eliminando a formação de cavaco, resultando em um processo limpo e sem limalhas. A forma da bucha é mais espessa em relação à peça, proporcionando maior área de contato na região do furo (MILLER, 2006).

É uma operação em que não ocorre a formação de cavaco, aplicada em chapas de pequenas espessuras com o intuito de aumentar a região onde será solicitado um esforço maior, ou até mesmo corte de rosca, provocando o aumento da espessura da chapa, em forma de rebarba, onde alguns autores definem como buchas escoadas (MILLER, 2007). Outra definição de furação é um método não tradicional que utiliza o calor gerado por atrito entre uma ferramenta rotativa cônica e a peça de trabalho para amaciar e penetrar o material de trabalho e gerar um furo onde o resultado é a forma de buchas (NARDI, 2012).

Entre os tipos de materiais aplicados para a fabricação das ferramentas como HSS, metal duro e ligas, a furação pode ser aplicada em materiais ferrosos e não ferrosos de espessuras relativamente finas até espessuras consideráveis de 12mm. De acordo com cada material a ser furado, a ferramenta apresenta suas particularidades de material base e revestimento, bem como o diâmetro nominal do furo podendo variar de 3,0 até 30mm, em função do material a ser furado (NARDI, 2011).

Para que a furação por atrito ocorra, são necessários alguns procedimentos: primeiro, a ponta de ferramenta se aproxima e penetra na peça de trabalho; segundo: o calor gerado amacia o material devido à fricção sobre a superfície de contato entre a ferramenta e peça; terceiro: o material é forçado para os lados, onde a ferramenta se move para frente de modo a formar a bucha por meio da seção cilíndrica de ferramenta e quarto passo: a rebarba, extrudada sobre a superfície pela ação do colar da ferramenta, e finalmente o retorno da ferramenta, que deixa o orifício com a bucha (OZLER, 2013).

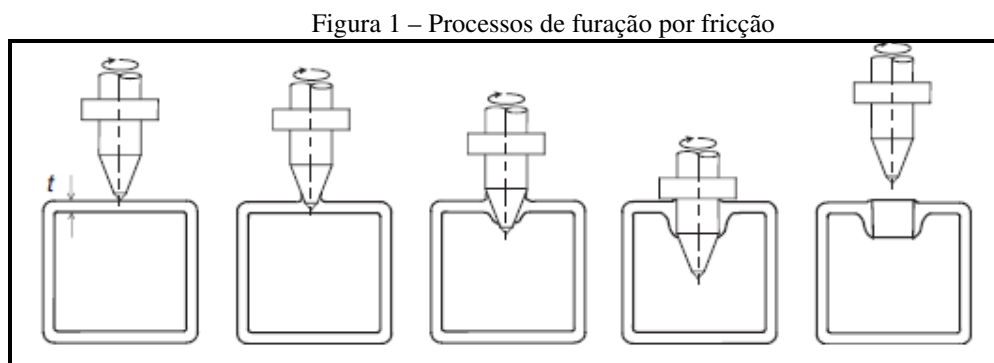
O processo de furação por fricção utiliza o calor gerado pelo atrito entre a parte cônica da ferramenta e a peça de trabalho, causando um amolecimento do material, permitindo penetrar e gerar uma saída de furo de trepanação, onde a parte cilíndrica é

responsável por definir o diâmetro final do furo (NARDI, 2011). O comprimento do cone da ferramenta proporciona a forma da bucha e o colar na face do material em função do cone e do raio do colar da ferramenta, caracterizando as etapas do processo. Quanto maior a espessura da chapa, mais longo será o comprimento, aproveitando-se melhor em condições que posteriormente será realizada laminação de rosca. Furação por fricção também é chamada de furação térmica, perfuração por fluxo, forma de perfuração ou fricção de perfuração (MILLER, 2007).

Neste processo, é possível apresentar algumas vantagens sobre a perfuração convencional onde é usado fluido de corte para auxiliar na troca de calor, e retirada de cavaco. Na furação por fricção, a temperatura causada pelo atrito da ferramenta dispensa a aplicação de fluido de corte como refrigerante.

Na condição do material, a temperatura resultante da fricção da ferramenta e peça, altera suas propriedades e a microestrutura da região do furo e a rebarba resultante. De acordo com os parâmetros usados na furação, a rebarba resultante apresenta formas diferentes conforme a velocidade de avanço, rotação e geometria da ferramenta. O comprimento do cone da ferramenta e o comprimento da rebarba são proporcionais, sendo mais curtos ou longos (MILLER, 2007).

A figura 1 apresenta as etapas do processo de furação:



Fonte: Miller, 2007, p.1637

Para cada material a ser furado, existem algumas modificações no perfil das ferramentas em função da ductilidade de cada material. Na aplicação da furação por fricção em aço de baixo carbono, em perfil quadrado, a ponta de ferramenta apresenta ângulo de 90° , facilitando a penetração em aços dúcteis e ligas metálicas (MILLER, 2006).

A aplicação de furação por fricção também é amplamente usada na linha industrial, como eletrodomésticos, estruturas metálicas, máquinas agrícolas, bicicletas, armazéns, construção civil. Nestes casos se aplicam furos em que será rosqueados com paredes finas, e

geometria complexa que dificulta o acesso com ferramentas, o que substitui o uso de porcas ou grampos soldados.

2.2 GEOMETRIA DE FERRAMENTAS USADAS NA FURAÇÃO POR FRICÇÃO

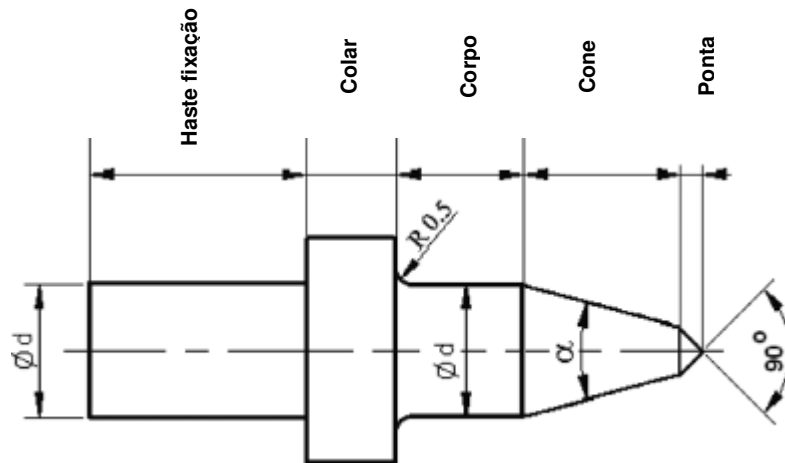
A geometria da ferramenta define o diâmetro do furo e o comprimento da bucha resultante, uma vez que uma ferramenta curta produz um furo cônico e uma ferramenta longa produz um furo cilíndrico. O comprimento da bucha depende de taxas de avanço de rotação. Taxas de avanços baixos com rotações altas resultam em buchas longas, influenciando na resistência à tração do furo roscado (LEE et al, 2008).

A ferramenta a ser usada deve apresentar geometria capaz de conformar o furo, podendo variar de acordo com a espessura do material a furar e apresentar uma resistência ao desgaste em função do calor resultante, além do material a ser aplicado na sua fabricação (NARDI, 2011). De acordo com o comprimento da bucha escoada e aplicação da furação, a geometria apresenta algumas particularidades a serem observadas para a definição.

- a) De acordo com o perfil a ser furado, o comprimento do cone da ferramenta pode ser maior ou menor;
- b) A ponta de contato inicial pode ser de ponta cônica ou em raio;
- c) A aplicação da furação, para corte de rosca, ou para fixação por parafuso, define o diâmetro do corpo da ferramenta;
- d) O colar de acabamento pode ser definido em raio ou com aresta cortante, para retirar o excesso de material na face;
- e) A haste de fixação é usada para prender a ferramenta em porta pinça.

Uma ferramenta é definida a partir de cinco regiões, definidas por centro ou ponta, cone, cilindro, colar e região da haste (OZLER, 2013). A ponta, a qual tem o primeiro contato com a peça, fornece suporte às direções radiais e axiais. A região cônica apresenta um ângulo definido responsável pela geração de parte dos contatos do material de atrito com a rotação e pressão axial, o comprimento do cone influencia na altura final da rebarba. A parte central define o diâmetro do furo, pressionando o material para o lado da bucha. O colar tem a função de arredondar a extremidade do furo ou retirar o excesso de material em situações fabricadas com gume de corte. A haste tem como finalidade a fixação da ferramenta em porta pinça. A figura 2 apresenta uma ferramenta usada na furação por fricção.

Figura 2 – Geometria de ferramenta de furação por fricção



Fonte: OZLER, 2013, p.471

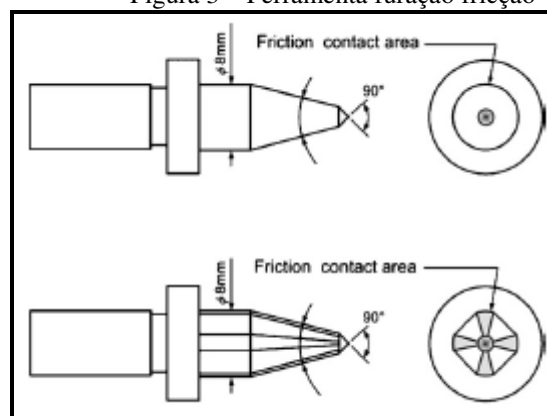
$\varnothing d$: diâmetro do furo (mm)

$\varnothing d$: Haste da ferramenta diâmetro (mm)

α : ângulo da ponta da ferramenta

A geometria da ferramenta pode ser modificada em função do material da peça a furar, definindo-se regiões principais com alteração na região do cone e corpo cilíndrico, que pode ser liso ou em forma octogonal (CHOW, 2008). Nesta condição, a região de ruptura tem por finalidade realizar um escareamento entre a face da peça e o furo para facilitar o posicionamento de uma próxima ferramenta. Na figura 3 é apresentada uma geometria aplicada em furação por fricção.

Figura 3 – Ferramenta furação fricção



Fonte: CHOW, 2008, p.181

Alguns fatores devem ser considerados para a definição da ferramenta como: tipo do material a furar; máquina a ser usada na furação; material aplicado na fabricação da ferramenta; diâmetro do furo; espaço para transpasse da ferramenta; revestimento; comprimento da rebarba; tipo de ponta na ferramenta. Estes aspectos devem ser avaliados, pois asseguram a vida da ferramenta, bem como a geometria do furo a ser executado.

A vida útil da ferramenta é definida pela quebra completa da mesma. Outras situações que comprometem o fim de seu uso são definidas de acordo com o desgaste da ponta e por apresentar furos de má qualidade. Ensaio de vida de ferramenta mostram de 8.000 a 15.000 furos em aços dúcteis, porém, estes valores estão diretamente associados a cargas aplicadas, parâmetros usados e temperatura obtida. Na maioria das aplicações são usados lubrificantes como sulfuretos de zinco antes da furação.

2.2.1 Materiais usados para fabricação da ferramenta

O material usado para fabricação de ferramentas deve apresentar algumas características que definirão o seu desempenho, força, e dureza, que devem ser observadas.

Citam-se algumas características:

- a) Elevada resistência ao desgaste;
- b) Resistência ao calor;
- c) Suportar pressão de compressão em relação ao avanço aplicado no início da furação;
- d) Dureza elevada.

Na furação de metais fundidos é empregado ferramenta de carboneto de tungstênio e carboneto de titânio, na matriz de cobalto, para perfuração de chapas de 4,0mm de espessura em Al380 de liga de magnésio AZ91D (MILLER, 2006). Na furação de Al380, MgAZ91D e AISI 1020 com ferramentas de tungstênio de carboneto e carboneto de titânio com matriz de cobalto o desgaste da ferramenta na furação com cobertura é menor e em ferramentas de AlCrN ocorre menor desgaste (MULLER et al, 2007).

Na avaliação de circularidade, microestrutura, rugosidade da superfície e dureza das paredes dos furos em aço AISI 304 a ferramenta fabricada de tungstênio não revestido, investigou a comparação entre a força na furação, rugosidade dos furos, desgaste de ferramentas e temperatura da superfície (LEE et al, 2008).

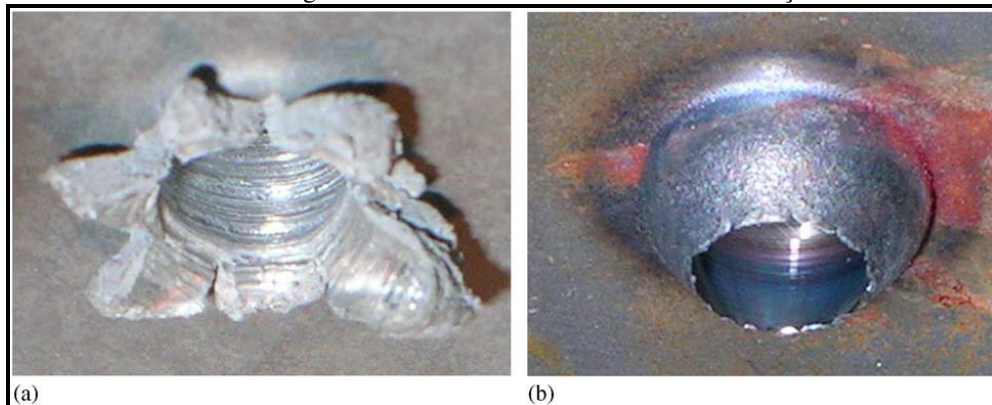
De acordo com as características do material a furar, a ferramenta, uma vez definida com requisitos já citados, atenderá ao processo, haja visto que não há um material específico defini para a fabricação.

2.3 MATERIAIS COMUMENTE FURADOS POR FRICÇÃO

Entre os materiais utilizados na furação por fricção, podem ser citadas ligas fundidas, aços carbono e ligas de alumínio, onde cada material, de acordo com suas propriedades, apresentam características na sua estrutura, de acordo com o comportamento durante a furação.

A figura 4(a) com furação em alumínio Al 380, a bucha escoada não mantém uma forma uniforme em função da fragilidade do material, não mantendo a geometria desejada. Para furação de aço SAE 1020, figura 4(b), é possível verificar a geometria da bucha de forma uniforme, caracterizando o aço pela condição de conformação mecânica.

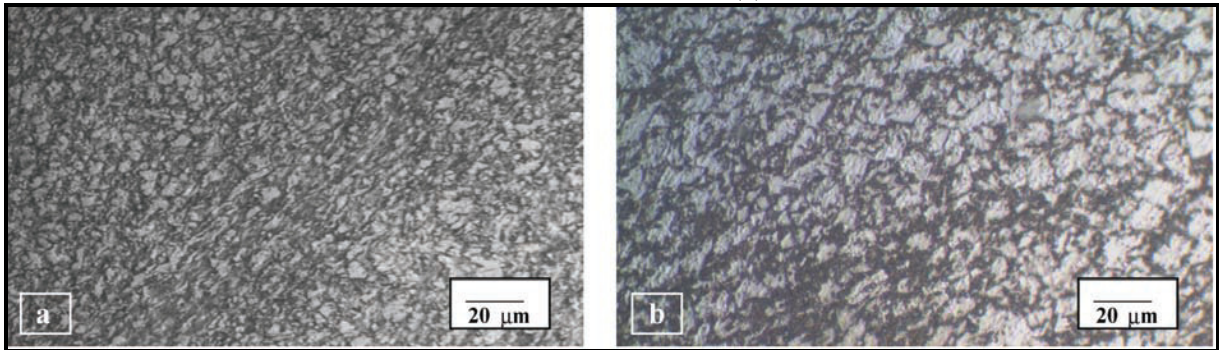
Figura 4 – Geometria da rebarba obtida na furação



Fonte: MILLER, 2006, p. 1527

Em aços *dual phase* que apresentam resistência a tração maiores que aços de baixa liga, a avaliação realizada por Nardi (2012) na geometria da rebarba e o comportamento de microestrutura, relacionou os parâmetros aplicados que interferiram na microestrutura do aço analisado.

Figura 5 – Microestrutura do aço *Dual Phase 800* com estrutura já atacada pelo calor na região do furo (a), Estrutura do material base (b).



Fonte: Nardi, 2012, p.19

Na figura 5(a) apresenta-se a microestrutura do aço *dual phase 800*, após a furação, onde a temperatura modificou o material, resultando em uma recristalização. Na figura 5(b), verifica-se o metal base antes da furação. Geralmente, a aplicação da furação por fricção é usada em perfis tubulares ou redondos para proporcionar corte de rosca no material. Em perfil quadrado de aço AISI 1010, foi avaliado a força e temperatura na região do furo de acordo com os parâmetros usados na furação (OZLER, 2013).

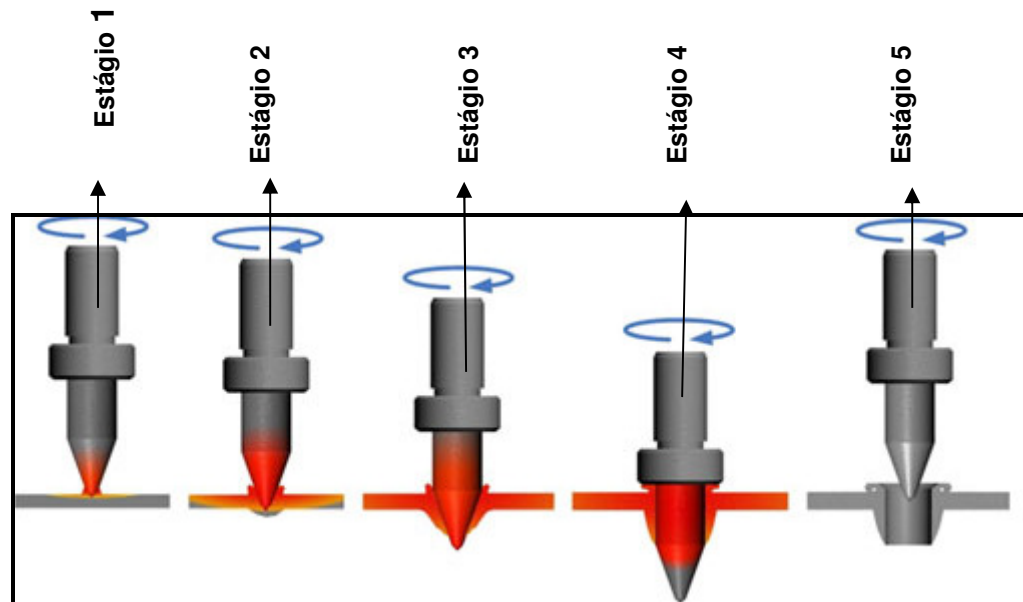
Já na furação de aço AISI 1015, em tubos quadrados de 19mm com espessura de 1,5mm, foi avaliado o desgaste de ferramentas por análise do número de furos realizados no material. (Miller,2007)

De acordo com o material a ser furado, é possível definir os parâmetros a serem usados, que influenciará no comprimento da bucha escoada, modificação da microestrutura do material, desgaste da ferramenta e geometria do furo.

2.3.1 Formação da bucha escoada e anilha

A formação da bucha escoada é resultado da deformação plástica, realizada pela ferramenta em contato com a peça de trabalho. Em seguida, na fase de impulsão principal, a ferramenta penetra na peça e ocorre a maior força axial (MILLER, 2006). Com o calor gerado pelo atrito e deslocamento, a formação da bucha é gradativa sendo formada ao longo de 5 estágios conforme a representação abaixo:

Figura 6 – Etapas do processo de furação



Fonte: KU *et al*, 2011, p. 938

A formação da bucha ocorre em 5 estágios. No estágio 1, a ferramenta em rotação tangencia a peça onde a ponta inicia o processo de atrito, gerando calor. No estágio 2, o cone entra em contato causando a deformação plástica. Neste ponto é a região em que dá-se a maior concentração de força na furação. Na fase 3, uma porção do material é expulso para a parte superior da peça (estágio 3), onde ocorre a penetração do cone da ferramenta, dando origem a anilha, que em determinadas condições pode ser removida, ou mantida servindo como apoio para posterior operação. A formação da bucha no estágio 4, está na penetração total do cone e corpo da ferramenta, conformando a sua dimensão definida pela geometria da ferramenta. Ao final, no estágio 5, a ferramenta é afastada da peça, onde finaliza-se a furação.

2.4 ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS

Durante a furação, o material é aquecido e sofre deformações o que resulta em zonas de aquecimento e regiões de durezas diferentes causadas pelo tratamento termomecânico da ação do calor. Miller *et al* (2006), destaca que durante a furação o material é submetido a diferentes taxas de deformação e temperatura, a área do fluxo continua para a área adjacente ao furo. Desta forma, é possível avaliar utilizando-se uma análise metalográfica e com medição de dureza as alterações microestruturais resultantes da ação da temperatura e

ferramenta no processo. De acordo com os parâmetros usados em matérias de baixa liga, alumínio ou aços inoxidáveis, a alteração de rotação, muda a microestrutura do mesmo material usado. Miller (2006) citam que, após a verificação de alterações microestruturais em atrito com diferentes materiais como aço carbono de baixa liga aços inoxidáveis e ligas de alumínio, condições variáveis e parâmetros do processo, afetam a microestrutura do mesmo material.

Cabe destacar que é fundamental conhecer a microestrutura do material como as propriedades mecânicas, uma vez que, deformadas pela ação da furação poderá influenciar na aplicação futura. Em casos especiais como de aços microligados ocorre à combinação de amolecimento e encruamento ou recristalização.

2.5 AÇOS DE BAIXA LIGA E ALTA RESISTÊNCIA (ARBL)

Os aços ARBL ou *Higt-Strength-Alloy Stell* (HSLA) são conhecidos por apresentar alta resistência e baixa liga. Caracterizam-se pela combinação de tenacidade, resistência mecânica e resistência a corrosão, diferenciando sua aplicação em máquinas agrícolas, construção civil, equipamentos industriais, linha rodoviária e automobilística. Sua aplicação nas áreas de engenharia em tubulações de produtos químicos corrosivos e em ambientes que necessitam resistência ao desgaste (ABOUEI, 2008).

Os aços *duais phase* consistem em ilhas martensíticas em matriz relativamente macia e dúctil de ferrita. A resistência ao desgaste aumenta com o aumento de fração de volume de martensita em comparação a outros aços normalizados (ABOUEI, 2008). A microestrutura dos aços ARBL está na presença de ferrita e perlita, podendo apresentar outras estruturas como ferrita-bainita, martensita temperada ou bainita. Elementos de liga como manganês, cromo, níquel, cobre e molibdênio aumentam a resistência mecânica, assim como nióbio, titânio e vanádio justificam sua tenacidade.

O endurecimento por precipitação é muito comum nos aços microligados, em razão das partículas extremamente finas que precipitam na ferrita durante o resfriamento lento desses aços após laminação a quente ou tratamento térmico. A intensidade desse endurecimento depende das características das partículas precipitadas, tais como resistência mecânica, estrutura, espaçamento, tamanho, formato e distribuição (GORNI, 2008). Já o endurecimento obtido na estrutura do material se deve ao refino do tamanho de grãos pela precipitação dos compostos intermetálicos, pelas discordâncias presentes e pela solução sólida

proporcionada pelos elementos de liga que elevam as propriedades mecânicas determinadas em condições estáticas, como é o ensaio de tração (MEI, SILVA, 2006).

Os mecanismos de endurecimento dos aços ARBL incluem o refino de grão, precipitação, aumento da densidade de discordâncias e endurecimento por solução sólida, que resulta com a adição de elementos formadores de carbeto e nitreto, laminação controlada, resfriamento controlado e controle de formas das inclusões.

A classificação dos aços ARBL esta baseada no seu emprego e aplicação levando em consideração a aplicação das propriedades mecânicas e metalúrgicas. Por serem aços de baixa liga e alta resistência, o limite de escoamento varia de 460 e 700MPa, diferenciando a classificação por faixas de categorias, como apresenta o quadro abaixo:

Quadro 1 – Classificação dos aços quanto as resistência em função do limite de escoamento

| Classificação do aço | Limite de escoamento (MPa) |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| Baixa resistência | Menor que 315 |
| Alta resistência | 315 - 460 |
| Extra-Alta-Resistência | 460 - 700 |
| Ultra-Alta-Resistência | Maior que 700 |

Fonte: Cardoso Jr, 2008, p.37

A dureza e resistência mecânica são aumentadas, porém reduz a ductilidade e tenacidade. A influência do nióbio nas propriedades finais nos aços ARBL está no aumento da resistência do material sem o aumento do teor de carbono, manganês na composição química. Titânio e vanádio em pequenas quantidades refinam o grão e melhoram a dureza a quente.

A determinação da resistência à tração está ligada a ensaios de tração que justifica sua classificação dentro do limite de escoamento. A realização de testes preliminares para a qualificação e ou homologação do aço, especialmente quando se consideram propriedades relativamente subjetivas, como soldabilidade e/ou conformação. A seleção do material está na condição da resistência mecânica, limite de escoamento de cada necessidade de aplicação do material.

2.6 METALURGIA DO AÇO ARBL LN 700

O aço ARBL LN 700 caracteriza-se por ser um aço de baixa liga, baixo teor de carbono e alta resistência. O aço de alta resistência apresenta teores de carbono até 0,08% e manganês como elementos primários. Outros elementos são definidos como secundários sendo nióbio (0,07 – 0,09%) e titânio (0,07 – 0,09%), que aumentam a resistência do aço, como sua classificação quanto ao limite de resistência. A presença de elementos secundários causa o refino do grão e aceleram a precipitação.

Quadro 2 – Composição química do aço LN 700

| Composição química (%) aço ARBL LN 700 | |
|---|--------|
| Carbono | 0,09 |
| Silício | 0,03 |
| Manganês | 1,56 |
| Fósforo | 0,021 |
| Enxofre | 0,004 |
| Alumínio | 0,062 |
| Cobre | 0,02 |
| Nióbio | 0,044 |
| Vanádio | 0,07 |
| Titânio | 0,114 |
| Cromo | 0,44 |
| Níquel | 0,02 |
| Molibdênio | 0,01 |
| Estanho | 0,02 |
| Nitrôgênio | 0,006 |
| Boro | 0,0001 |
| Calcio | 0,013 |
| Antimônio | 0 |
| Chumbo | 0,001 |

Fonte: o autor

Ver tabela (metodologia)

O aço LN 700 é caracterizado pela estrutura de grão fina. A presença de grão grandes na estrutura tem sido relacionada como uma anomalia mecânica no comportamento como baixa tenacidade (CHAKRABARTI *et al*, 2007). As aplicações em estruturas metálicas se justificam pelo comportamento na soldagem. Quando submetidos a operações de usinagem não apresentam alterações do grão em função de sua estrutura ferrítica.

2.7 TENSÕES RESIDUAIS

Tensões residuais são as tensões elásticas que um corpo apresenta sem a existência de carregamentos externos ou gradiente de temperaturas. Toda tensão residual está em equilíbrio onde o somatório de forças resultantes dos momentos gerados é igual à zero. O valor máximo em módulo que as tensões residuais que um material pode chegar são o próprio limite de escoamento do material. Quando os valores são acima do limite de escoamento resultam em deformação plástica do material ocorrendo uma redistribuição das tensões residuais. De modo geral, as tensões residuais têm comportamento elástico podendo ser sobrepostas à tensão de serviço. Quando um material sofre um carregamento de tração, está sobrecarregado com tensões trativas na superfície do componente.

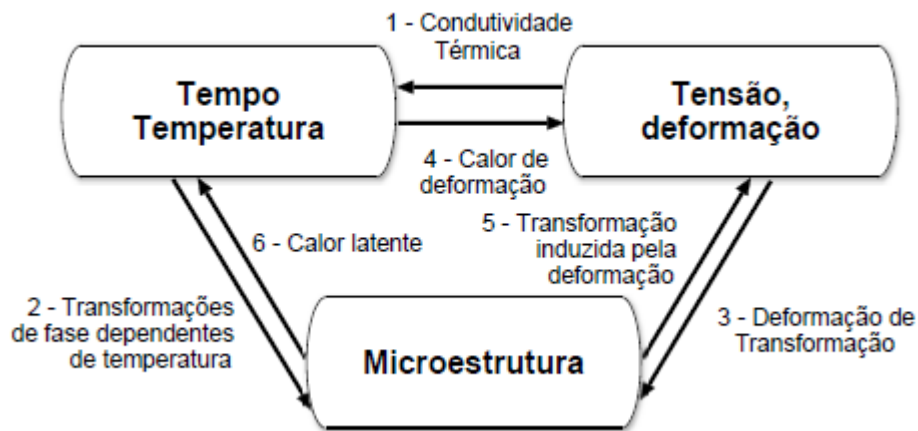
A tensão residual nos materiais tem origem na fabricação e processos de manufatura, sendo estas relacionadas a processos químicos, térmicos ou mecânicos. Todos os processos de fabricação que resultam em deformação plástica produzirão tensões residuais o que afetará as propriedades do material quanto à resistência a fadiga, a corrosão e ruptura.

Conforme Vemanadoina *et al* (2014), a tensão residual é associada ao processo de soldagem, pela presença de tensões e deformações residuais resultantes pelo aporte térmico do calor, mudando a fase do material durante a fusão. A origem das tensões residuais podem ser citadas situações de:

- a) Tensão residual de processos de fabricação: usinagem, soldagem, lixamento, retificação;
- b) Tensão residual de tratamentos térmicos: cementação, têmpera, quando ocorre variação de temperatura na peça;
- c) Tensão residual de deformação plástica: laminação, extrusão, forjamento, *shot-peening*, onde a deformação não é uniforme no material.

De acordo com o processo de fabricação que o material está sujeito, apresentara um determinado tipo de tensão residual.

Figura 7 – Relação entre temperatura, tensão e microestrutura



Fonte: Bhadeshia, 2002, p. 3

Como as tensões residuais são consequência das interações do material com o meio, alguns fatores são considerados fundamentais na concentração de tensões. Fatores direcionados com o meio, como o tempo, temperatura, tensão, deformação e microestrutura. As características do material que influenciam nas tensões residuais são a condutibilidade térmica, coeficiente de dilatação, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, plasticidade termodinâmica, cinética das transformações, mecanismos de transformações plásticas.

2.7.1 Técnica de medição de tensão residual

A medição de tensão residual é extremamente difícil em função de que são resultantes de qualquer carregamento externo, pois se baseiam na mudança de determinada propriedade antes ou depois do carregamento. A mais conceituada referência de medição de tensão residual é o *Handbook of measurements of residual stress*, editado por Jian Lu, pesquisador francês que em 1988 definiu o método (LU, 1996).

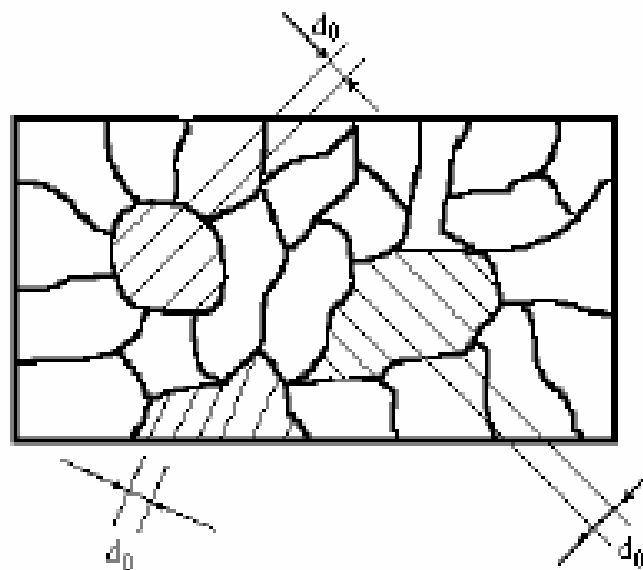
Para Dreier e Denkena (2014), existem vários métodos para medir tensões residuais introduzidas por processos de fabricação. Os mais comuns são pelo método de difração de raios X e por furação, porém, com algumas limitações na superfície do material. Outros métodos diferentes são usados para determinar o estado de tensão residual principalmente em peças grandes, sendo alguns com necessidade de remoção de material para determinar e tensão existente.

Lee *et al* (2015), definem tensão residual pode ser caracterizado de forma não destrutiva usando técnicas de difração de raio X devido a profundidade de penetração que geralmente é submetida a um *stress* substancial. No processo de medição de tensão residual, podem ser aplicadas técnicas como: furo cego, remoção de camadas, seccionamento, difração raio X, difração de nêutrons, técnicas de ultrassom e técnicas magnéticas.

2.7.1.1 Difração de raio X

Com a presença de tensões, as orientações entre os planos variam por conseqüências da deformação elástica. Se a tensão for trativa, as distâncias entre os planos perpendiculares aumentarão, enquanto no plano paralelo ao campo de tensões vão diminuir. Se a variação das distâncias interplanares puder ser mensurada, entende-se que há uma deformação e possui tensões residuais atuantes. A técnica de difração de raios-X tem como objetivo medir as distâncias interplanares para calcular a tensão residual existente.

Figura 8 – Distâncias interplanares de um corpo sem tensões residuais



Fonte: Fitzpatrick; Fry, 2005, p.5

Conforme Fitzpatrick e Fry (2005), um corpo de prova avaliado apresentará tensões residuais quando as distâncias interplanares apresentarem diferenças após a verificação. Um feixe difratado pode ser definido como um feixe composto de um grande número de raios espalhados reforçando-se mutuamente a intensidade das ondas que é somado de acordo com uma interferência construtiva, conhecida como lei de Bragg, sendo:

$$2d \cdot \sin\theta = n \cdot \lambda$$

Onde:

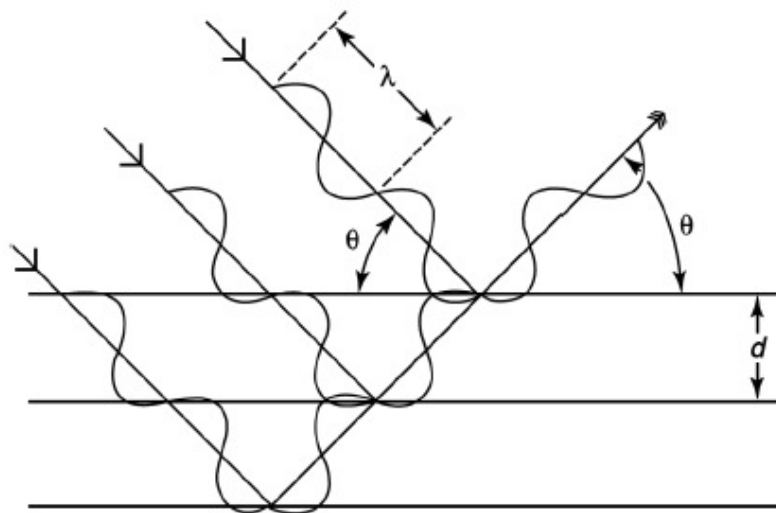
d: distância interplanar (nm)

θ : ângulo entre o feixe incidente e o plano difrator. (°)

λ : comprimento da onda; (nm)

n: (1) um inteiro.

Figura 9 – Espelhamento e difração em um arranjo cristalino

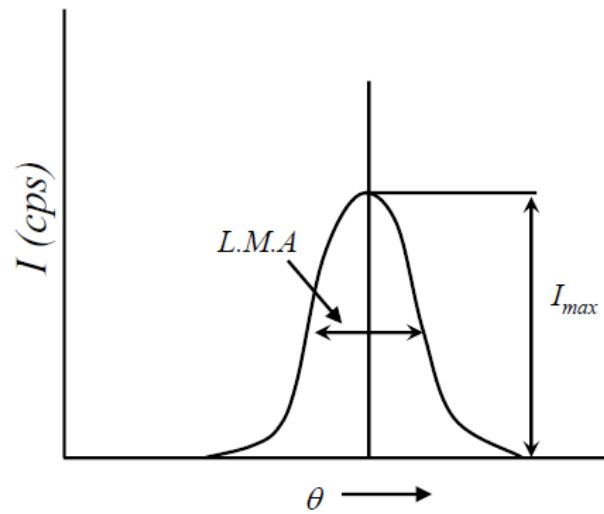


Fonte: Fitzpatrick; Fry, 2005, p. 5

O espelhamento pode ser usado como um *strain-gage*, que obtém a medida da deformação em direção ao vetor de difração. Os espaçamentos do ângulo de Bragg chamados de (d) em um material livre de tensões são calculados onde geram o desvio. Para a geração do pico máximo da tensão como FWHM (*full width at half maximum*) é dado pela diferença entre dois valores extremos de uma variável no qual a função é metade do seu valor.

O método de dispersão ocorre pelo comprimento de onda em que é emitido os raios X passando por um cristal de espaçamento definido. O ângulo onde ocorre a difração é uma função do comprimento de onda, permitindo a construção do espectro de energia (comprimento da onda) pela intensidade dos raios X.

Figura 10 – Determinação da largura e meia altura em um pico de difração.



Fonte: Fitzpatrick; Fry, 2005, p. 44

O pico gerado em cada ponto de difração de raios X gera o gráfico considerando 20% do valor máximo para gerar o ponto de difração. Para cada ponto avaliado, é gerado um gráfico que mostra a intensidade da tensão no ponto. Os resultados coletados nos gráficos permitem visualizar a tensão longitudinal e transversal, a intensidade da deformação pela operação realizada, permitindo avaliar pontos individualmente em relação ao metal base.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o procedimento utilizado para a realização de ensaios de furação por fricção no aço LN 700 e a metodologia usada para avaliar os resultados.

3.1 METODOLOGIA

Para a realização dos ensaios, 2 grupos com parâmetros de rotação e avanço foram definidos. Após a furação, serão avaliados os resultados em duas condições: 1º avaliação de resultados dimensionais: cilindricidade, circularidade, dureza e rugosidade, 2º avaliação: microdureza, região afetada pela temperatura e tensão residual.

3.1.1 Definição do material para fabricação da ferramenta

Para a definição do material fabricação da ferramenta, foram selecionados três tipos: VC 131 que apresenta resistência ao calor e trabalho a quente, aço HSS M6, aço rápido usado na fabricação de ferramentas e metal duro UK 40, que apresentou dureza de 79HRC.

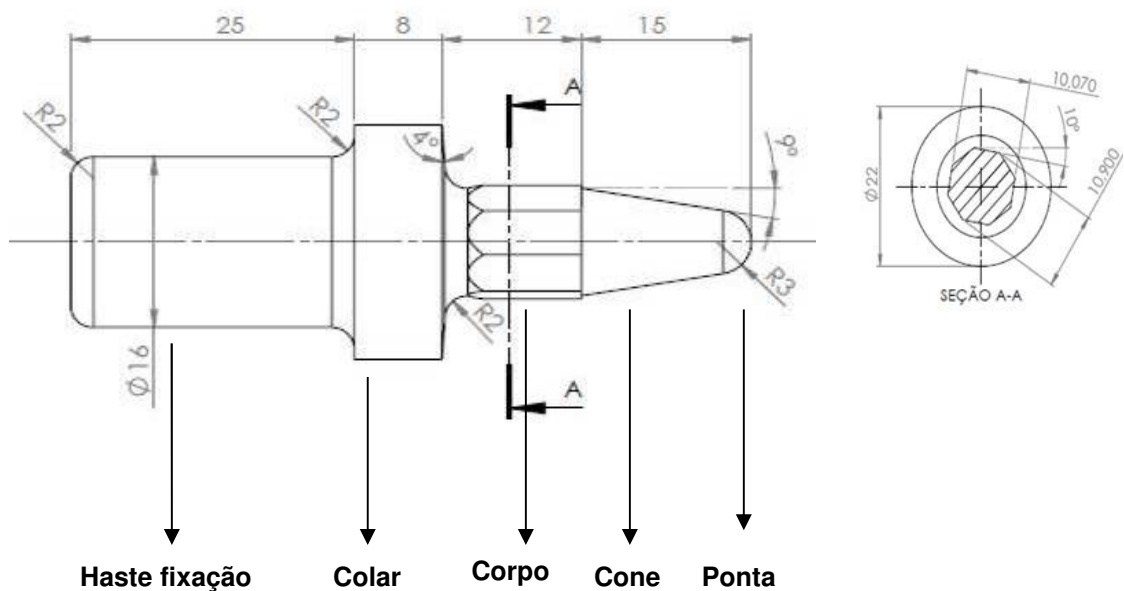
Fabricadas as ferramentas, testes de furação com aço carbono ABNT 1020, foram realizados para assegurar a integridade da ferramenta no aço ARBL LN 700. Nesta condição, ferramentas fabricadas em VC 131 e HSS, não resistiram à fricção em contato com a peça, sendo descartada a hipótese e aplicação para a furação em estudo. Posteriormente, direcionaram-se os ensaios para fabricação em metal duro UK-40 para efetuar a caracterização da furação por fricção no aço LN 700.

3.1.2 Definição da geometria da ferramenta

A definição da geometria da ferramenta aplicada nos ensaios baseou-se em metodologias realizadas por pesquisas de KU *et al* (2011), Nardi (2011), Ozler (2013) e Miller (2006), que definiram a geometria em função do comprimento da rebarba a ser obtido, porção de material a ser depositado sobre a peça e operação posterior após a furação. Como a área de deslocamento da ferramenta na peça estava limitada às dimensões do perfil com vão livre de 40mm, a definição da geometria foi determinada pelo comprimento do cone, que está

diretamente associado ao comprimento da rebarba a ser obtido. O raio da ponta apresenta uma concordância com o início do corpo de 3,0mm. A dimensão do corpo da ferramenta foi definida com o objetivo de corte de rosca M12, sendo que o diâmetro primitivo é de 11,90mm. Entre o corpo e o colar, há um raio de arredondamento de 2,0mm com finalidade de conformação do material sobre a peça. O colar dá sustentação ao corpo da ferramenta bem como suporta a força axial exercida pela pinça na ferramenta. A haste de fixação, definida pela proporcionalidade do colar com diâmetro de 16mm para fixação em pinças e porta pinças padronizado.

Figura 11 – Ferramenta para furação.



Fonte: o autor.

3.1.3 Critérios para definição dos parâmetros de furação

A definição dos parâmetros para furação por fricção no trabalho desenvolvido foi baseada em estudos de processos já realizados em aços de espessura menor ou igual ao material em estudo. Foram definidos parâmetros para a furação em duas situações a serem realizadas considerando rotação e avanço de acordo com o deslocamento da ferramenta ao longo da furação. Conforme a figura 11, com definição do perfil da ferramenta a ser usada nos ensaios de furação e suas partes, os parâmetros definidos para o estudo da caracterização, são apresentados no quadro 03.

Quadro 03 – Parâmetros definidos para o estudo da caracterização

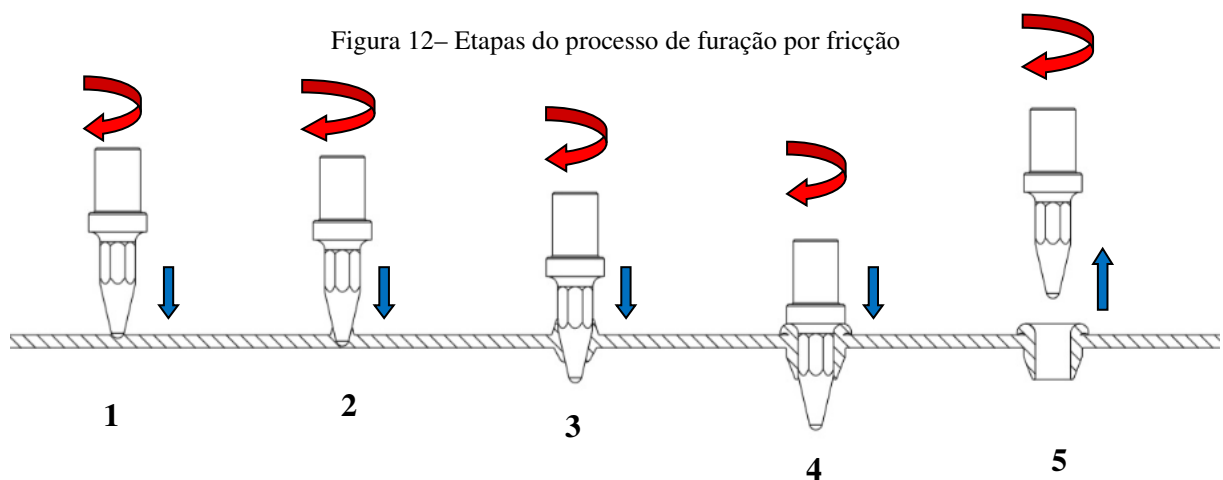
| Etapas | Grupo 1 (Parâmetros Baixos) | | Grupo 2 (Parâmetros Altos) | |
|--------|-----------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|
| | Rotação (RPM) | Avanço (mm/min) | Rotação (RPM) | Avanço (mm/min) |
| 1 | 3000 | 150 | 4000 | 250 |
| 2 | 2500 | 200 | 3500 | 300 |
| 3 | 2000 | 250 | 3000 | 350 |

Fonte: o autor

Após a definição dos parâmetros foi estabelecido uma sequência se ser estabelecida para os ensaios de furação por fricção no aço LN 700.

3.1.4 Fluxograma do processo de furação por fricção

As etapas da furação são diferenciadas na medida em que a ferramenta avança ao longo da peça, conforme a figura 12.



Fonte: o autor.

Nas etapas de furação, a ferramenta realiza o trabalho na seguinte ordem para o grupo 1:

- a) Aproximação da peça com rotação de 3000 rpm com avanço de deslocamento rápido;
- b) Contato da ponta iniciando atrito com a peça, com rotação de 3000 rpm e avanço de 250mm/min, sendo a penetração de 3mm na peça;
- c) Penetração do cone, com alteração da rotação para 2500 rpm e avanço de 200mm/min, com a penetração de 18mm, dando origem a bucha escoada;
- d) Conformação do furo com penetração do corpo da ferramenta, rotação 2000 rpm e avanço de 150mm/min, onde a ferramenta se desloca 31mm da face da peça, conformando o furo e caldeando a anilha superior;
- e) Retorno da ferramenta mantendo a rotação e avanço da etapa 4 até a saída total do furo.

Depois de efetuados os furos do grupo 1, será repetido o mesmo procedimento para o grupo 2.

3.1.5 Máquina usada nos ensaios de furação

Os ensaios de furação foram realizados no centro de usinagem, CNC, marca Romi, Modelo Discovery 800, com capacidade de atingir até 7500 rpm e avanço de 30m/min, com comando de programação Fanuc Oi Mc.

Na preparação da máquina foram realizados os procedimentos padronizados para início de operação. Posteriormente, a programação para a furação diferenciando dos dois grupos definidos pelos parâmetros. Para a fixação do perfil utilizou-se morsa mecânica que proporciona facilidade na fixação e remoção da peça. Com todas as etapas preparatórias executadas foram definidos as distâncias entre centros dos furos de 45mm para evitar aquecimento do metal base entre as furações. Realizada a simulação na máquina iniciou-se a furação, furando duas linhas com sequência de seis furos cada.

3.2 EXECUÇÃO DA FURAÇÃO POR FRICÇÃO

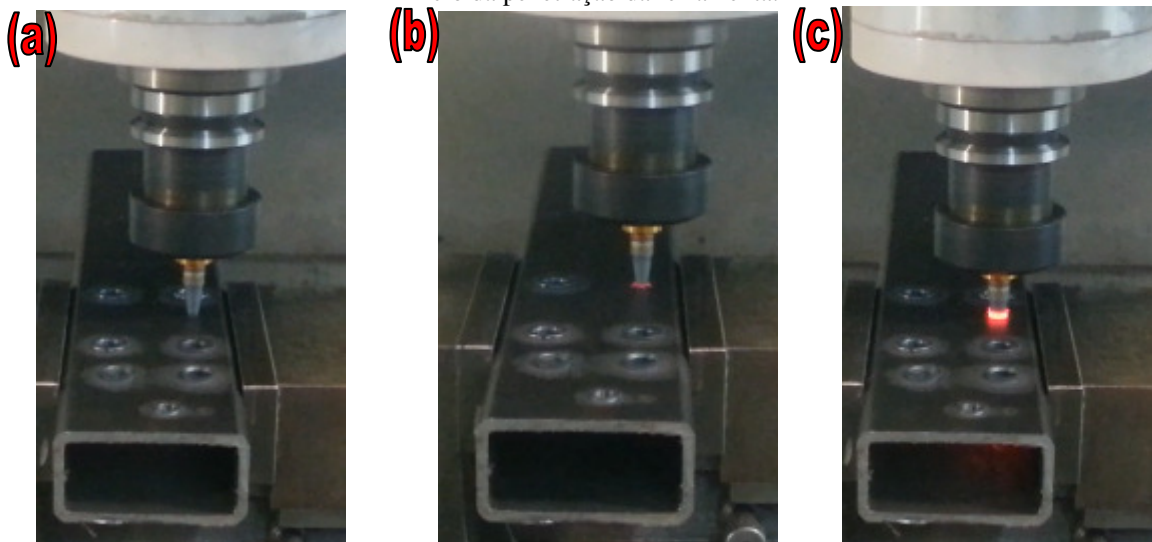
Os ensaios de furação foram realizados aplicando a sequência abaixo:

- a) Área de contato da ponta, com posicionamento na superfície da peça;
- b) Início da penetração da ponta, (ponta cônica ou ponta esférica);
- c) Avanço do cone na peça, aumentando o atrito e força;

- d) Contato da parte cilíndrica da ferramenta na peça, iniciando a conformação do furo de acordo com a medida a ser realizada;
- e) Contato do colar da ferramenta, com a finalidade de conformar a porção de material sobre a peça para futura operação e acabamento final.

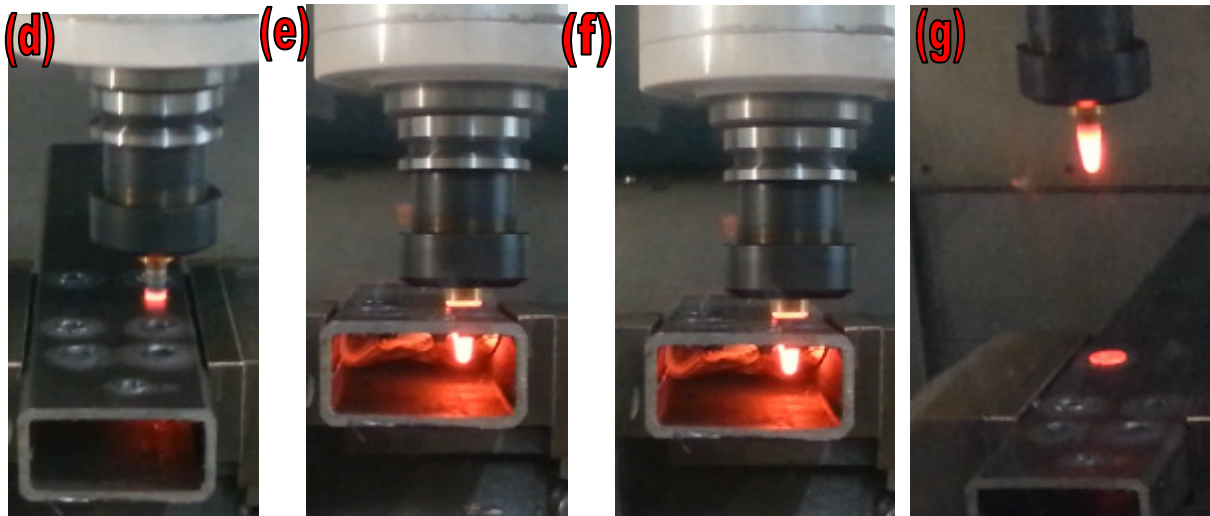
Na medida em que a ação da ferramenta era aplicada na peça, etapas eram realizadas com a alteração de rotação e avanço. A ponta da ferramenta encosta na peça, com rotação maior, e inicia o processo de aquecimento da peça, o avanço, sendo menor, faz com que ocorra o amolecimento da peça pelo calor gerado, definido por etapa 1. Penetrada a ponta da ferramenta, ocorre a alteração da rotação e avanço para o segundo estágio, reduzindo-se a rotação e aumento o avanço alcançando a fase elástica na peça, empurrando parte do material para cima que dará origem a rebarba inferior, etapa 2. Neste momento, ocorre a maior força na furação. Na terceira etapa, em que o corpo da ferramenta inicia a conformação do furo, na etapa 3, as arestas vivas presentes na geometria, conformam o furo deslocando o material sobressalente para fora, onde a rotação e avanço, novamente são alterados tendo com objetivo a geometria final do furo. Após a total conformação, o colar presente no corpo da ferramenta, conforma a anilha superior na parte de cima da peça.

Figura 13 – Etapas da furação por fricção. a) aproximação da ferramenta; b) contato entre ferramenta e peça; c) início da penetração da ferramenta.



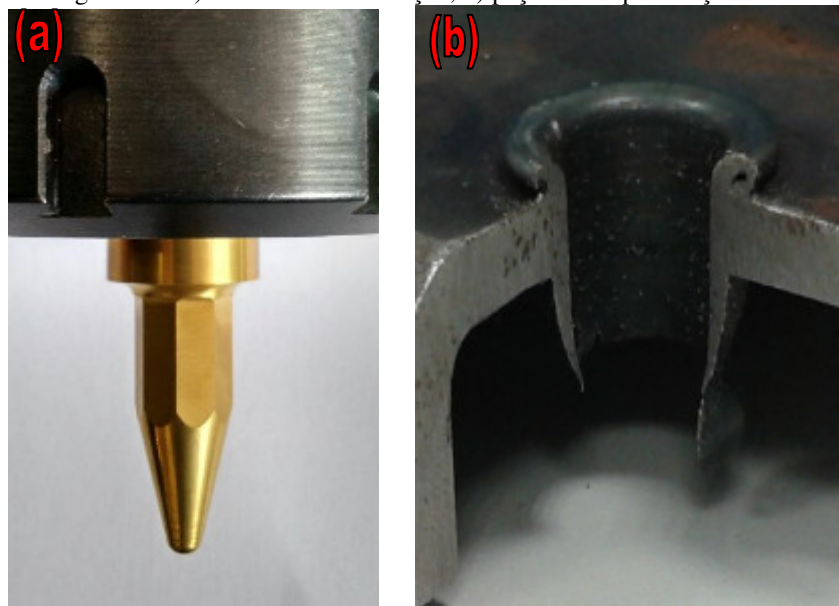
Fonte: o autor.

Figura 14 – Etapas da furação por fricção: d) penetração do cone, e) penetração do corpo, f) formação da anilha, g) recuo da ferramenta.



Fonte: o autor.

Figura 15 – a) Ferramenta de furação, b) peça furada por fricção



Fonte: o autor.

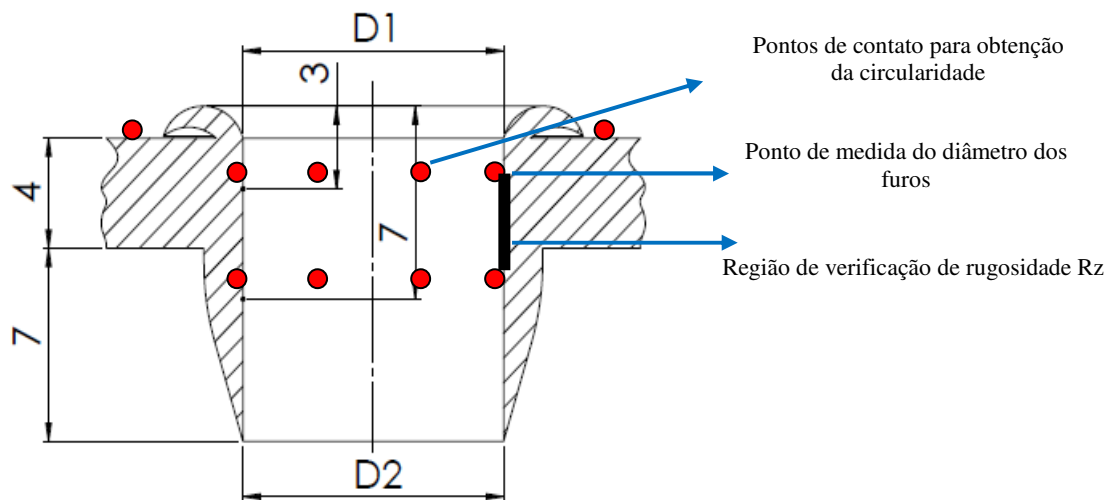
Na figura 15 (a) a geometria da ferramenta usada para furação. A ponta da ferramenta possui raio de 2mm, o cone é concordante com o corpo cuja dimensão de 11,9mm. No colar, um raio de arredondamento de 2,0mm forma a anilha e dá sustentação a ferramenta. O resultado da furação (figura 15(b) apresenta a peça furada com a anilha na parte superior e a bucha escoada resultante da deformação do material).

3.2.1 Medição de cilindridade, circularidade e rugosidade nos ensaios

Após a realização da furação usando os parâmetros definidos para os grupos 1 e 2, foram avaliados a geometria resultante da furação. Nesta etapa foram avaliados o diâmetro do furo, comprimento da bucha escoada, circularidade e cilindridade de acordo com os ensaios realizados. A primeira análise foi a coleta de resultados das dimensões dos furos, posteriormente a circularidade e cilindridade e por final o comprimento altura da bucha escoada. Para isso usou-se uma máquina de medição por coordenadas marca Zeiss modelo Prismo, com deslocamento em X, Y e Z e capacidade no eixo X: 1000mm, Y: 1800mm, Z: 1000mm sendo a medição por coordenadas com um software CALIPSO versão 4.6.

Na análise de medição de cilindridade dos furos, definiram-se dois pontos ao longo do comprimento da furação para a realização da medição, sendo a primeira na região de entrada do furo a 3mm da borda e a segunda a 7mm na região da bucha escoada.

Figura 16 – Distâncias definidas para coleta de dados circularidade, cilindridade e rugosidade em amostras furadas.



Fonte: o autor.

A circularidade apresenta a variação de medida entre um ponto e outro num comprimento determinado. A medição de circularidade avalia possíveis alteração de valores de circularidade entre os parâmetros aplicados nos grupos 1 e 2. Para a determinação dos resultados de circularidade, foram respeitados os pontos estabelecidos pela forma de medição pelo software de definição de dimensões.

Para o ensaio de rugosidade, nos grupos 1 e 2 foram avaliados todos os furos com verificação em 5 pontos em cara furo dentro de uma região que abrange o metal base e a

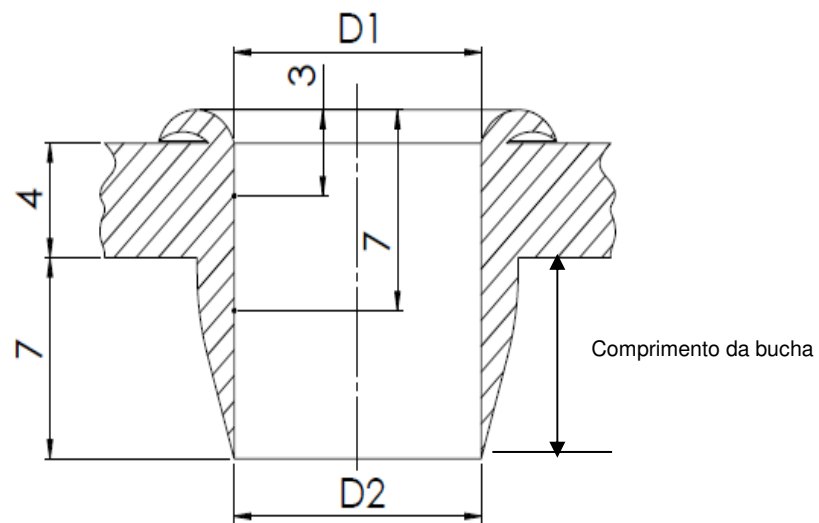
bucha escoada, conforme desenho apresentado. A escala Rz determina os valores dos picos e vales mais altos ao longo um comprimento da amostra foi adotada para a avaliar os resultados.

3.2.2 Comprimento da bucha escoada

O resultado da furação por fricção é gerar uma bucha escoada pela ação da ferramenta sobre o material. A bucha escoada é importante no processo, pois será útil em uma próxima etapa no aproveitamento do material. Neste estudo foi avaliado o comprimento das buchas escoadas com a finalidade de comparar os comprimentos de acordo com os grupos avaliados.

Para determinar o comprimento das buchas foi usada uma máquina de medição por coordenadas Marca Mitutoyo modelo QM-Measure 353, estabelecendo um procedimento de medidas padrão para levantamento dos resultados.

Figura 17 – Bucha escoada



Fonte: o autor.

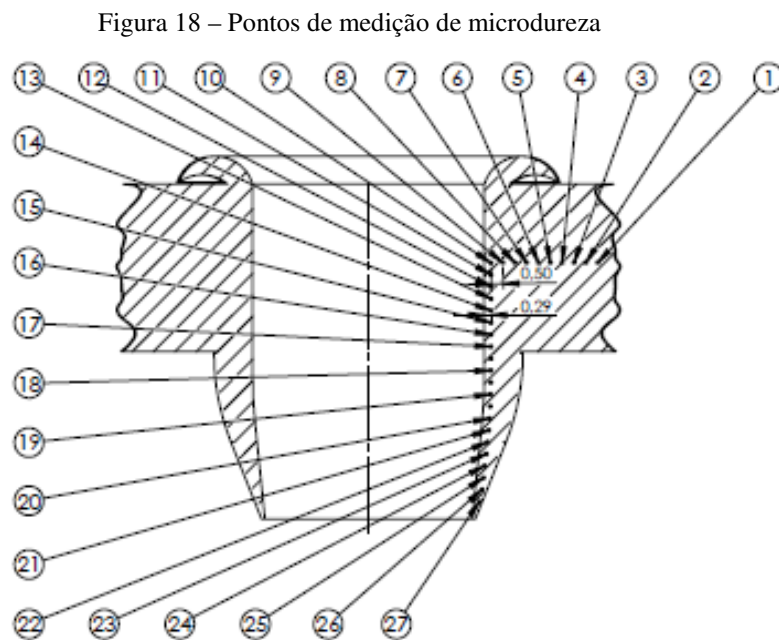
3.2.3 Determinação de microdureza Wickers

Na realização de ensaio de microdureza é necessário preparar as amostras de acordo com tamanho da região a avaliar e o espaço disponível para fixação no equipamento. Após a preparação, faz-se um ataque com a nital 5%, para identificar a região do metal base, região afetada e bucha escoada.

A técnica de medição de microdureza é um procedimento usado em laboratório onde o equipamento é simples, dados quantitativos são gerados em curto espaço de tempo e a

preparação da superfície é feita para exame de microscopia óptica (FACTOR; ROMAN, 2000).artigo 11

Para a realização da medição foi utilizado um microdurômetro Marca Shimadzu modelo HVM-G 20ST. A figura 18 apresenta as distâncias e número de pontos definidos para determinação de microdureza no perfil do material ARBL LN 700.



Fonte: o autor.

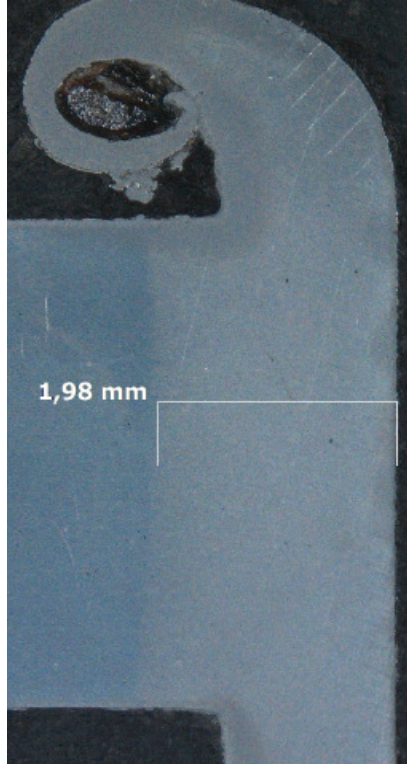
Nos ensaios de microdureza a carga utilizada foi de 200 gramas. Oito amostras de cada grupo foram coletadas e preparadas. Com os resultados usou-se um software de análise estatística para a avaliação dos resultados.

3.2.4 Região afetada pelo calor

A temperatura gerada na furação é capaz de modificar a estrutura cristalina do material ao longo do metal base. Durante a deformação plástica do material, o aquecimento ao redor do furo poderá causar alterações que comprometerão o uso do material. Para determinar a distância afetada pela temperatura foi usado uma lupa de macrografia que permite verificar a região houve a ação da temperatura no perfil. A verificação da região afetada foi feita com

lupa de macrografia marca: Shimadzu modelo HMV-G 205T. Os corpos de prova foram preparados seguindo os procedimentos para a realização da análise.

Figura 19 – Amostra para determinação de região afetada pela temperatura



Fonte: o autor.

Colpaert (2008), destaca que, para a preparação clássica onde é realizado corte com serra ou em torno convencionais sendo as opções:

- a) A amostra é embutida em plástico ou resina que permite maior firmeza e facilidade de manuseio, além de permitir medidas para preservar as arestas durante o polimento;
- b) A amostra é submetida diretamente à preparação as superfícies de interesse que envolve o lixamento em lixadeiras motorizadas seguindo uma sequência de papéis de lixas de carboneto de silício com resfriamento e lubrificação por água.

Para atacar os corpos de prova a serem avaliados o reagente usado foi Nital 5%.

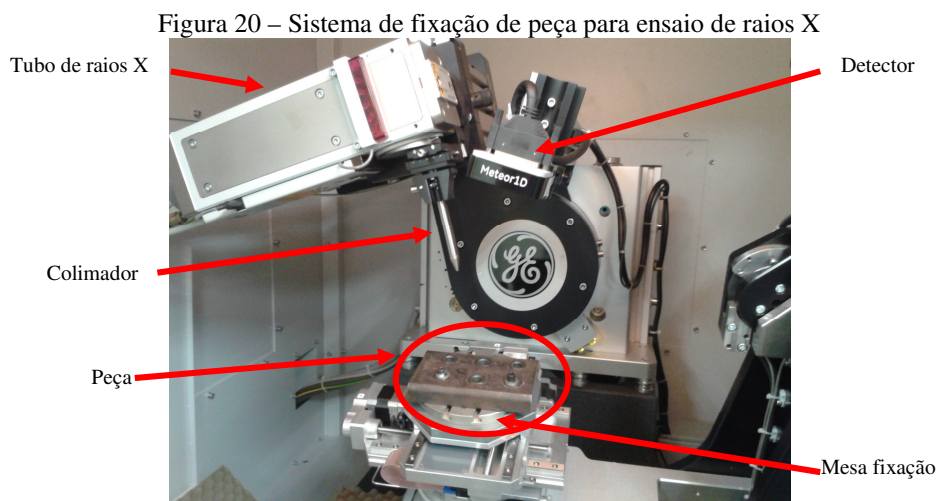
3.2.5 Ensaio de tensão residual

Para avaliar a tensão residual das amostras feitas nos ensaios de furação por fricção, foi utilizada uma máquina General Electric, modelo: Seifert Charon XRD M, com capacidade de inclinação da mesa, de -60° a 60° . Este equipamento é composto de uma mesa de fixação

onde a peça é fixada por meio de presilhas e parafusos, um sistema de posicionamento do colimador para posicionamento do feixe de raios X e o colimador que é o acessório que direciona o feixe de raios X na peça.

O sistema para geração dos raios X nesta análise é radiação de cromo, que tem como característica no aço manter o ponto do feixe de elétrons sem ocorrer a distorção.

Nos ensaios de tensão residual, o equipamento apresenta um diferencial na condição de inclinação da peça, nos sentidos longitudinal e transversal, permitindo que a peça possa ser inclinada entre -60° a 60° . A inclinação mínima e máxima é determinada de acordo com a complexidade da peça bem como avaliando o posicionamento do colimador em relação ao detector, durante a preparação do ensaio.



Fonte: o autor.

A preparação e fixação da peça no equipamento estão relacionadas com a geometria, deve ser posicionada plana em relação ao colimador. Um posicionador apalpador é usado para acelerar a verificação da peça em relação ao colimador. Após a fixação, ajusta-se o colimador para verificar a diferença angular em relação ao detector. O ângulo resultante será o ponto de lançamento do feixe de raios X em cada amostra, inclinado nos sentidos longitudinal e transversal. Na medida em que são realizados os ensaios, o software calcula a defasagem angular pela lei de Bragg gerando o gráfico com pontos das tensões ao longo da amostra.

Para os ensaios de tensão residual os dados usados de acordo com a análise preliminar da peça foram:

- a) Passo: 0,1
- b) Tempo passo: 9 seg
- c) Ângulo theta: 147 a 166°

- d) Ângulo PSI: -45° a 45°
- e) Direções: longitudinal e transversal
- f) Geração dos raios X: radiação de cromo.

4 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de furação por fricção no aço LN 700, com comparação de valores entre grupos de furação. Através do software Sisvar, serão interpretados os resultados coletados para diferenciar a possibilidade de diferença entre resultados de circularidade, cilindricidade, comprimento da bucha, microdureza, rugosidade e tensão residual.

4.1 GEOMETRIA DA FURAÇÃO

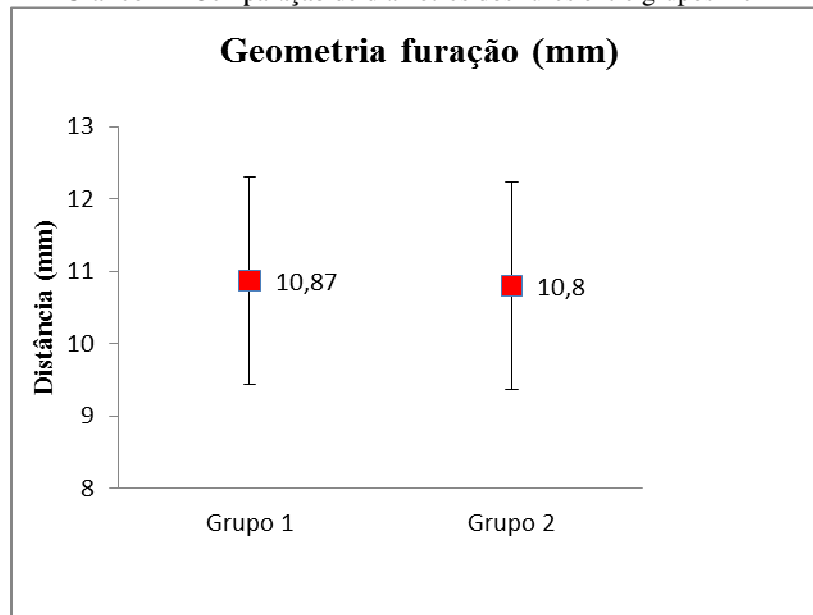
Depois de realizados os ensaios de furação realizou-se a coleta de dados para avaliação e comparação das dimensões dos furos. Os resultados coletados da sequência de furação para o grupo 1 e 2 são apresentados no quadro 04. Para a comparação dos valores coletados, através de análise estatística confrontou-se os valores entre grupos para verificar a possibilidade de alterações que os parâmetros usados poderiam interferir na furação. A confiabilidade é de 95%.

Quadro 4 – Diâmetros dos furos resultantes da furação

| Amostra | Diâmetros dos furos (mm) | | | |
|--------------|--------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| | Grupo 1 | | Grupo 2 | |
| | Parte superior (d1) | Região da bucha (d2) | Parte superior (d1) | Região da bucha (d2) |
| 1 | 10,9310 | 10,7420 | 10,9765 | 10,4990 |
| 2 | 10,9450 | 10,7610 | 10,9645 | 10,7030 |
| 3 | 10,9545 | 10,8550 | 10,9615 | 10,6905 |
| 4 | 10,9215 | 10,8080 | 10,9600 | 10,6780 |
| 5 | 10,9325 | 10,8760 | 10,9870 | 10,4745 |
| 6 | 10,9855 | 10,7885 | 10,9890 | 10,5820 |
| 7 | 10,9223 | 10,7825 | 10,9320 | 10,9320 |
| 8 | 10,9645 | 10,8156 | 10,9755 | 10,5460 |
| Média | 10,94 | 10,80 | 10,97 | 10,64 |

Fonte: o autor.

Gráfico 1 – Comparação de diâmetros dos furos entre grupos 1 e 2



Fonte: o autor.

Na análise, os resultados coletados são confrontados e calculados por meio de análise para avaliar se há diferenças entre os resultados coletados. Entre os valores avaliados é possível afirmar que entre os parâmetros usados nos ensaios para caracterização do processo de furação no aço, não apresentou diferença entre as dimensões coletadas. Na análise realizada, o desvio padrão foi 1,43.

Em relação à dimensão nominal definida pela geometria da ferramenta de 10,9mm, os valores de 10,87mm para o grupo 1 e 10,8 para o grupo 2, estão dentro de valores a serem aplicados, pois o valor do desvio padrão resultante na análise, justifica os resultados avaliados. Numa aplicação fabril, ambos os valores dos parâmetros são permitidos na condição de geometria da furação,

4.2 COMPRIMENTO DA BUCHA ESCOADA

A furação por fricção resulta em uma bucha escoada que posteriormente é usada para corte de rosca. Nos ensaios realizados nos grupos de furação, resultou em uma bucha com características que permitem a utilização, em função da plasticidade do material. No quadro 5, a seguir, é apresentado os comprimentos das buchas de cada grupo.

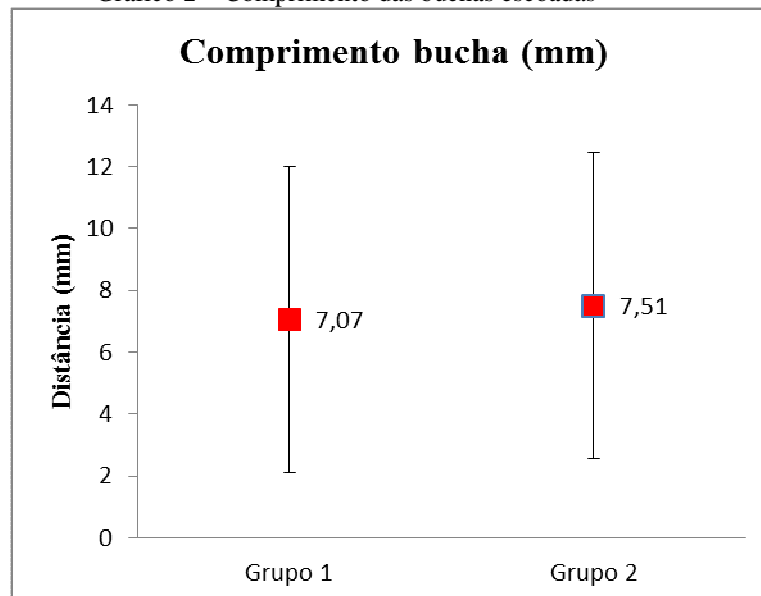
Quadro 5 – Comprimento das buchas escoadas de cada grupo de furação

| Amostra | Comprimento da bucha (mm) | |
|--------------|---------------------------|---------|
| | Grupo 1 | Grupo 2 |
| 1 | 6,74 | 7,17 |
| 2 | 7,36 | 7,46 |
| 3 | 7,06 | 7,59 |
| 4 | 7,10 | 7,24 |
| 5 | 7,02 | 7,81 |
| 6 | 7,15 | 7,76 |
| 7 | 7,11 | 7,58 |
| 8 | 7,09 | 7,51 |
| Média | 7,07 | 7,51 |

Fonte: o autor.

A coleta de dados apresenta os comprimentos das buchas escoadas que comparados entre si, tem objetivo de definir diferenças entre grupos de furação. No gráfico 02 são apresentados os resultados dos comprimentos da buchas escoadas na furação.

Gráfico 2 – Comprimento das buchas escoadas



Fonte: o autor.

Na avaliação estatística dos comprimentos da bucha resultantes do processo de furação por fricção caracteriza que os resultados da análise realiza entre os grupos 1 e 2 não apresentaram variações, pois entre as amostras, o desvio padrão calculado foi 4,94 e média do grupo 1 7,07mm e 7,51mm, para o grupo 2. Como os resultados estão dentro do desvio padrão, ambos os grupos atendem a condição de comprimento das buchas escoadas. Para

processos em que o comprimento de fundamental em aplicações como corte de rosca, os parâmetros usados nos ensaios podem ser aplicados.

Relembra-se que o comprimento da bucha escoada na furação por fricção está diretamente associado na definição do comprimento do cone da ferramenta. Para tanto, nesta análise onde os valores de rotação e avanço foram diferentes havia a possibilidade de resultar em diferentes comprimentos.

Figura 21 – Bucha escoada



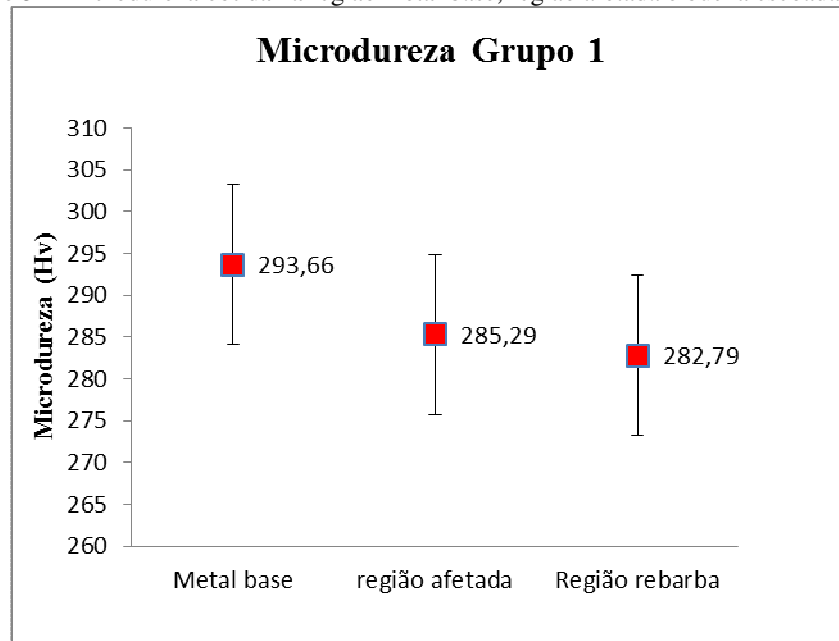
Fonte: o autor.

4.3 ANÁLISE DE MICRODUREZA

Na avaliação de microdureza dos corpos de prova ensaiados foi realizada de acordo com a metodologia definida para avaliar os resultados considerando 3 aspectos: 1º avaliação de microdureza região do metal base, 2º região de transição entre metal base e bucha escoada, 3º região da bucha escoada. Com os dados avaliados, a análise será para cada grupo e entre grupos para analisar possibilidade de diferença entre parâmetros usados nos ensaios.

O gráfico 3, apresenta resultados de microdureza do grupo 1.

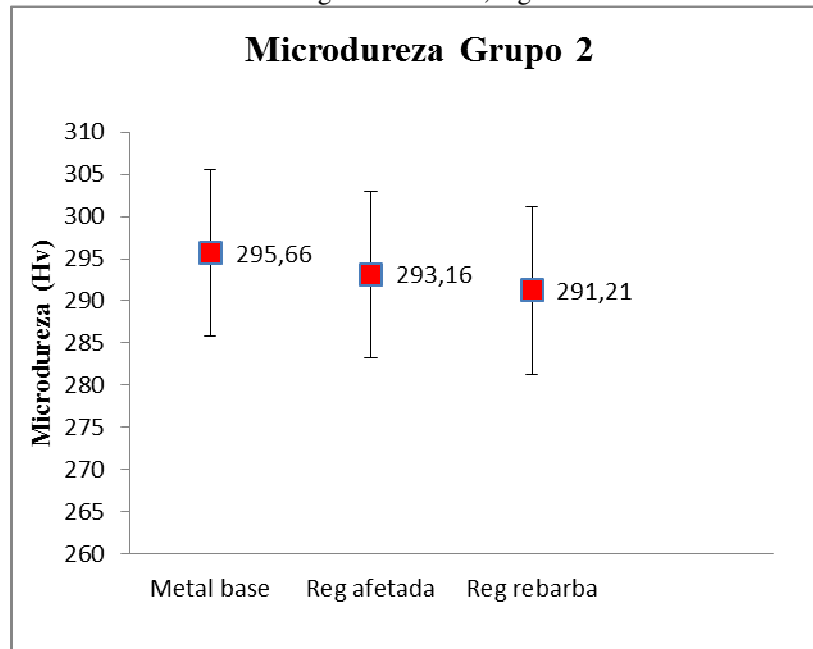
Gráfico 3 – Microdureza obtida na região metal base, região afetada e bucha escoada grupo 1



Fonte: o autor.

Na avaliação de resultados de microdureza no grupo 1, observa-se que ao longo do perfil ocorre redução de dureza do material. Para tanto, a diferença entre áreas avaliadas do perfil, metal base, região afetada e bucha escoada, não atingem a um grau de significância que caracterizam alteração ao longo do perfil. Nesta análise, em que foram avaliados 27 corpos de prova com 8 pontos cada um, em comparação ente si, não apresentam variações dentro do método estatístico teste “t”, com 5% de erro. O desvio padrão é de 9,59 mostrando que a influência dos parâmetros usados nos ensaios não interfere na dureza do material.

Gráfico 4 – Microdureza obtida na região metal base, região afetada e bucha escoada grupo 2

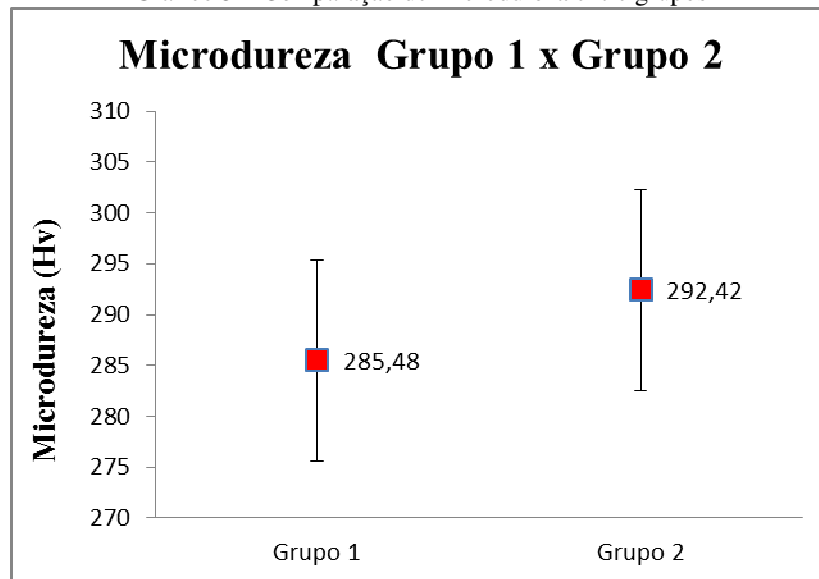


Fonte: o autor.

Para o grupo 2, onde manteve-se a mesma metodologia aplicada para o grupo anterior, avaliando-se as três regiões do perfil. Nesta análise, é possível verificar que os valores coletados ao longo das amostras apresentaram pouca variação, caracterizando que a temperatura gerada na furação não alterou a dureza ao longo do perfil avaliado. O desvio padrão nas análises foi 9,89.

Na avaliação para este grupo, os parâmetros usados na furação mostram que a influência de rotação e avanço não alteram a microdureza do material.

Gráfico 5 – Comparação de microdureza entre grupos



Fonte: o autor.

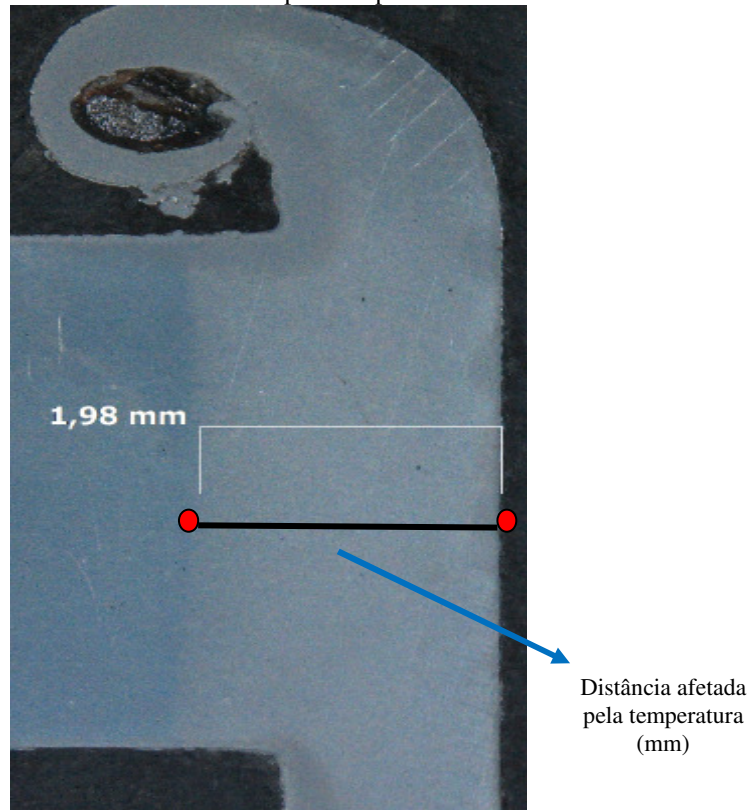
Na avaliação entre grupos, com os parâmetros usados para caracterizar a furação por fricção no aço LN 700, os resultados analisados não atingem um limite para caracterizar diferenças na microdureza. O desvio padrão de 9,85 permite assegurar que não há diferença entre grupos nos resultados avaliados na análise estatística.

É importante considerar que os parâmetros usados nos ensaios apresenta, diferentes valores de rotação e avanço, o que possibilitaria a alteração de microdureza do material. Para tanto, evidencia-se que no aço LN 700, a influência dos parâmetros não apresentou alteração nos ensaios realizados.

4.4 REGIÃO AFETADA PELA TEMPERATURA

Na furação por fricção, o aumento da temperatura é resultante pelo atrito causado pela rotação da ferramenta com a peça e o avanço proporciona a deformação plástica ao longo do perfil a ser furado. A temperatura gerada, pode afetar uma região ao longo do perfil alterando as propriedades microestruturais do material. Na figura 22 (abaixo) apresenta-se um corpo de prova usado para avaliação do comportamento do material pela região afetada.

Figura 22 – Distância afetada pela temperatura amostra 4



Fonte: o autor.

No quadro a seguir, é apresentado os resultados obtidos na medição da distância em mm afetados pela temperatura durante a furação grupos 1 e 2

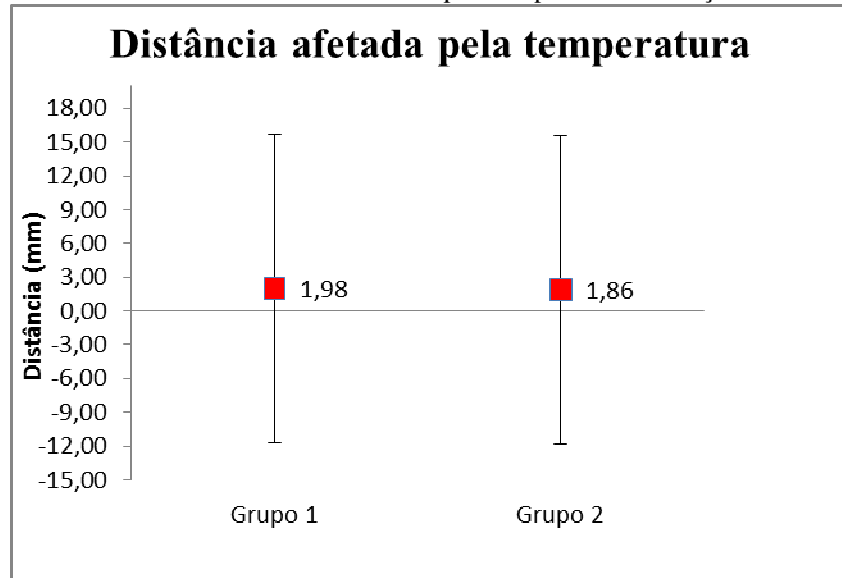
Quadro 6 – Distâncias resultantes pela ação da temperatura na furação

| Distância camada afetada pela temperatura | | |
|--|---------------------|---------------------|
| | Grupo 1 (mm) | Grupo 2 (mm) |
| Amostra 1 | 1,59 | 1,59 |
| Amostra 2 | 1,87 | 1,58 |
| Amostra 3 | 2,12 | 2,06 |
| Amostra 4 | 1,98 | 2,24 |
| Amostra 5 | 2,18 | 1,58 |
| Amostra 6 | 2,36 | 1,95 |
| Amostra 7 | 1,85 | 1,66 |
| Amostra 8 | 1,89 | 2,23 |
| Média | 1,98 | 1,86 |

Fonte: o autor.

O gráfico 6, mostra a média e desvio padrão dos grupos 1 e 2 com os resultados da distância afetada pela temperatura na furação.

Gráfico 6 – Distância afetada pela temperatura na furação



Fonte: o autor.

A temperatura gerada durante a furação afeta uma determinada região do furo. A distância afetada está relacionada com o tempo de furação, velocidade de avanço e rotação, que pode aumentar a região afetada.

Para os resultados apresentados no gráfico 06 (acima) a distância afetada pela temperatura na furação foi 1,98mm no grupo 1 e 1,86 no grupo 2. No grupo 1, havia a possibilidade dos resultados apresentarem área afetada termicamente serem de proporção maior, associados aos parâmetros usados onde o avanço é menor. Já para o grupo 2, com avanço sendo o dobro em relação ao grupo 1, manteve-se valores semelhantes, onde não apresentou variações que sejam significativas para a condição.

Para tanto, avaliando os resultados estatisticamente, entre grupos, verifica-se que na furação do aço LN 770, nas duas condições de parâmetros aplicadas nos ensaios a região afetada pela temperatura não apresenta significância. Na análise do teste “t”, o desvio padrão apresentado é 13,68.

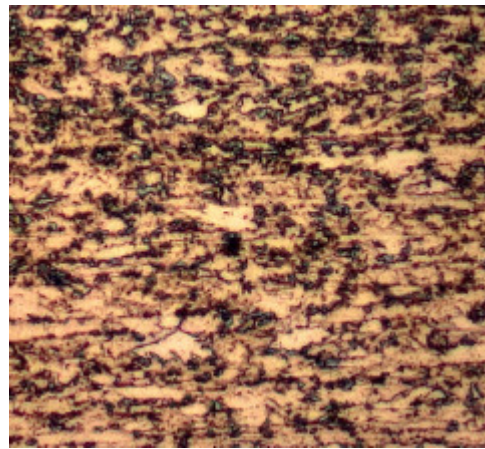
Nas figuras 23 e 24, mostram a região do metal base em corpos de prova furados para verificar a possibilidade de alteração da microestrutura após ação da temperatura.

Figura 23 – Interface Metal base (50x)



Fonte: o autor.

Figura 24 – Interface Metal base (500x)

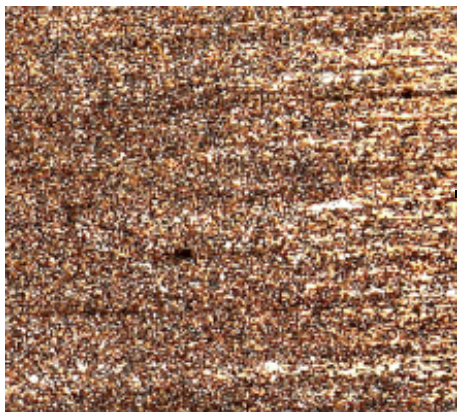


Fonte: o autor.

No material, é possível verificar uma concentração de bainita e ferrita, onde a ferrita está disposta por pontos e regiões ao longo da amostra.

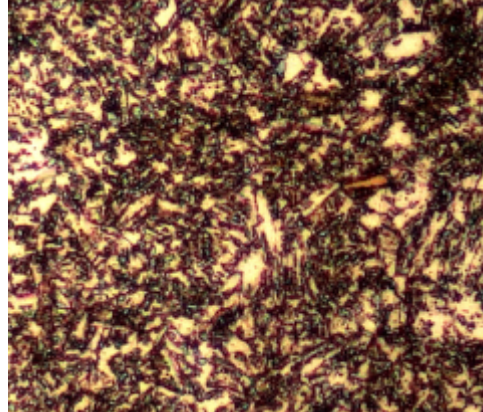
Nas figuras 25 e 26, apresenta uma parte de transição, parte do metal base e material a escoado que irá formar a bucha escoada, onde a ação da temperatura durante a furação altera a microestrutura diferenciando a região de transição, a ferrita apresenta forma alongada em maior concentração

Figura 25 – Interface Região afetada (50x)



Fonte: o autor.

Figura 26 –Interface Região afetada (500x)



Fonte: o autor.

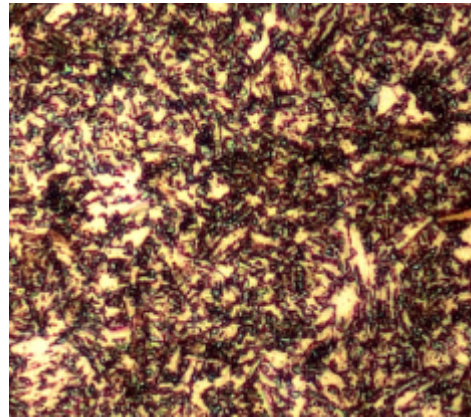
Na região da bucha escoada, figura 27 e 28, a bucha escoada, a microestrutura do material é alterada, a ferrita encontra-se alongada, em maior concentração, com características de ferrita de *Widmanstätten*, onde é uma estrutura grosseira em que aparece contorno de grãos de ferrita em forma de agulhas. Esta estrutura é obtida pela alta temperatura em função do calor durante o estado de transformação. Em condições onde o resfriamento é mais rápido, permite a formação de ferrita intergranular, e coerente com o apresentado por Colpaert (2008).

Figura 27: Interface Rebarba (50x)



Fonte: o autor.

Figura 28: Interface Rebarba (500x)



Fonte: o autor.

4.5 ENSAIOS DE RUGOSIDADE

Durante a furação, a ferramenta em contato com a peça proporcionará uma rugosidade nas laterais dos furos. Para os ensaios de furação utilizou-se o índice de rugosidade Rz que determina o maior e menor pico ao longo do comprimento de mostragem. No grupo 1, foram avaliados 5 furos sendo coletados 5 amostras de cada, em pontos diferentes. Já para o grupo 2, usou-se 8 furos com as mesmas orientações ao grupo 1.

Os resultados coletados foram avaliados estatisticamente com grau de confiabilidade de 95%, aplicando teste “t”, comparando os valores dentro do grupo e entre grupos.

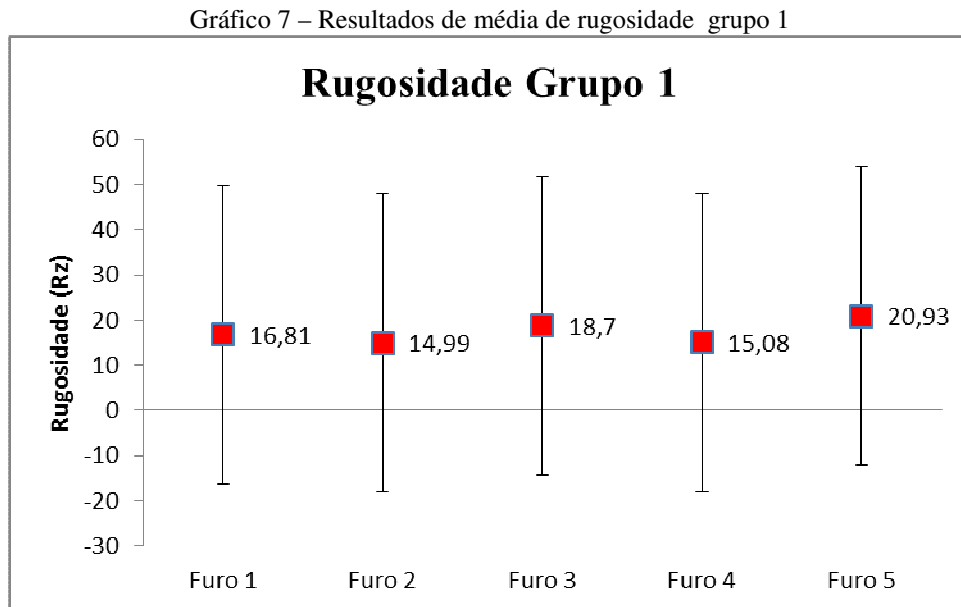
O quadro 7, a seguir, apresenta os resultados de rugosidade Rz medidos de acordo com as amostras de furações do grupo 1.

Quadro 7 – Resultados de rugosidade Rz

| Rugosidade obtida Grupo 1 (Rz) | | | | | |
|---------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Amostra | ponto 1 | ponto 2 | ponto 3 | ponto 4 | ponto 5 |
| 1 | 17,339 | 13,454 | 26,516 | 13,168 | 17,79 |
| 2 | 15,577 | 13,19 | 17,11 | 12,601 | 17,337 |
| 3 | 12,64 | 15,18 | 17,662 | 20,504 | 13,504 |
| 4 | 16,461 | 16,561 | 9,062 | 11,009 | 15,859 |
| 5 | 19,323 | 11,915 | 26,269 | 10,721 | 23,139 |
| 6 | 19,567 | 19,675 | 15,629 | 22,522 | 38,002 |
| Média | 16,82 | 15,00 | 18,71 | 15,09 | 20,94 |

Fonte: o autor.

Na análise dos resultados de rugosidade do grupo 1 são apresentados no gráfico 7, abaixo:



Fonte: o autor.

Na avaliação de rugosidade no grupo 1, os resultados variaram de 16,81 à 20,93Rz para as amostras. Nesta condição as durezas se mantêm ao estailizadas ao longo das amostras. Na avaliação estatística, dentro do grupo, os resultados não apresentam variações em relação a análise e o desvio padrão é 33, assegurando a estabilidade dos resultados.

Desta forma, em aplicações para uso da furação, as rugosidades avaliadas justificam a aplicação dos parâmetros para determinação de rugosidade.

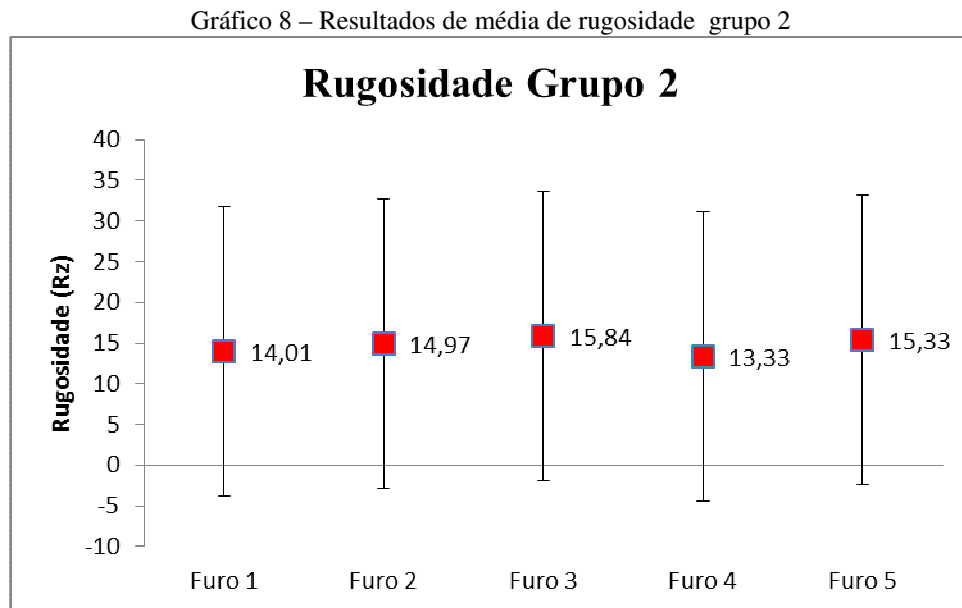
Para o grupo 2, os resultados da coleta de dados são apresentados no quadro 8.

Quadro 8 – Resultados de rugosidade Rz

| Rugosidade obtida Grupo 2 (Rz) | | | | | |
|---------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Amostra | ponto 1 | ponto 2 | ponto 3 | ponto 4 | ponto 5 |
| 1 | 15,538 | 15,522 | 16,151 | 14,962 | 13,965 |
| 2 | 21,572 | 18,827 | 16,304 | 16,4 | 15,921 |
| 3 | 14,311 | 11,357 | 15,141 | 10,885 | 14,354 |
| 4 | 14,76 | 16,918 | 18,034 | 14,143 | 17,58 |
| 5 | 12,345 | 14,744 | 11,251 | 11,857 | 16,718 |
| 6 | 9,853 | 16,332 | 18,135 | 11,737 | 11,217 |
| 7 | 11,293 | 14,734 | 15,632 | 13,429 | 14,77 |
| 8 | 12,451 | 11,362 | 16,145 | 13,271 | 18,122 |
| Média | 14,02 | 14,97 | 15,84 | 13,33 | 15,33 |

Fonte: o autor.

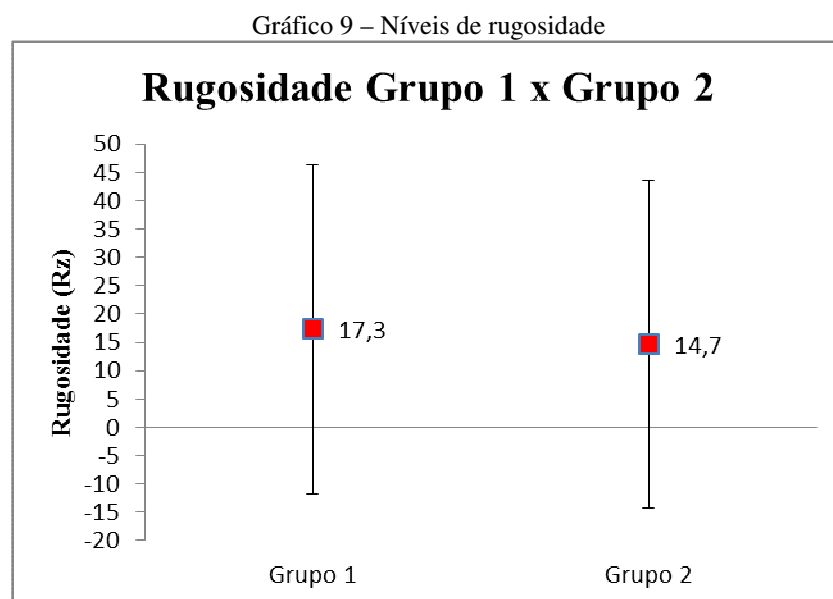
No gráfico 8 é apresentado o resultado da rugosidade para o grupo 2 e o desvio padrão.



Fonte: o autor.

Na avaliação é possível comparar que os resultados de rugosidade no grupo 2 apresentam uniformidade em cada ponto avaliado. O desvio padrão de 17,78 é menor em relação ao grupo 1, o que caracteriza os parâmetros serem superiores, permitindo melhor rugosidade dos furos.

Avaliando os grupos entre si, conforme é apresentado no gráfico 9, defini-se a aplicação dos parâmetros e a melhor situação de rugosidade obtida nas amostras analisadas.



Fonte: o autor.

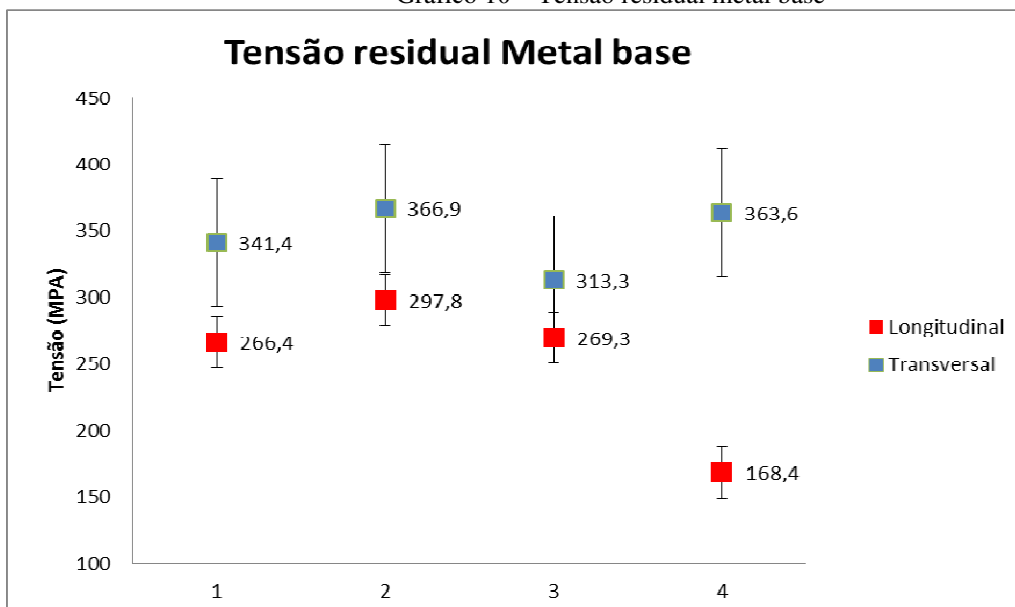
Para esta condição, os valores do grupo 2 apresentam menor rugosidade, permitindo aplicações para operações futuras. Nesta comparação entre grupos, o desvio apresentado foi 29,02. A menor rugosidade na avaliação, está ligada ao avanço, pois reduz a quantidade de material a ser aderido nas laterais do furo, fazendo que a região seja mais lisa, melhorando a rugosidade.

4.6 ANÁLISE DE DADOS DE TENSÃO RESIDUAL

A tensão residual foi usada para comparar o comportamento do material ensaiado após a furação. No estudo realizado foram avaliados 4 pontos distintos numa amostra do material base, com orientações longitudinal e transversal que são sentidos definidos do processo de coleta de dados do procedimento de análise, que posteriormente serão usados para confrontar com resultados de tensões coletadas em amostras dos grupos 1 e 2. O resultado da tensão residual foi apresentado em duas condições: 1) tensão trativa onde os valores apresentados são positivos que caracterizam baixa resistência à fadiga, 2) tensão compressiva, em que os valores negativos caracterizam uma faixa menor que zero, onde asseguram aplicações em situações de fadiga quando expostos em condições de trabalho.

O resultado de tensão residual do metal base é apresentado no gráfico 10 sendo a coleta de dados em quatro pontos na superfície mantendo a mesma metodologia para os grupos de furação.

Gráfico 10 – Tensão residual metal base



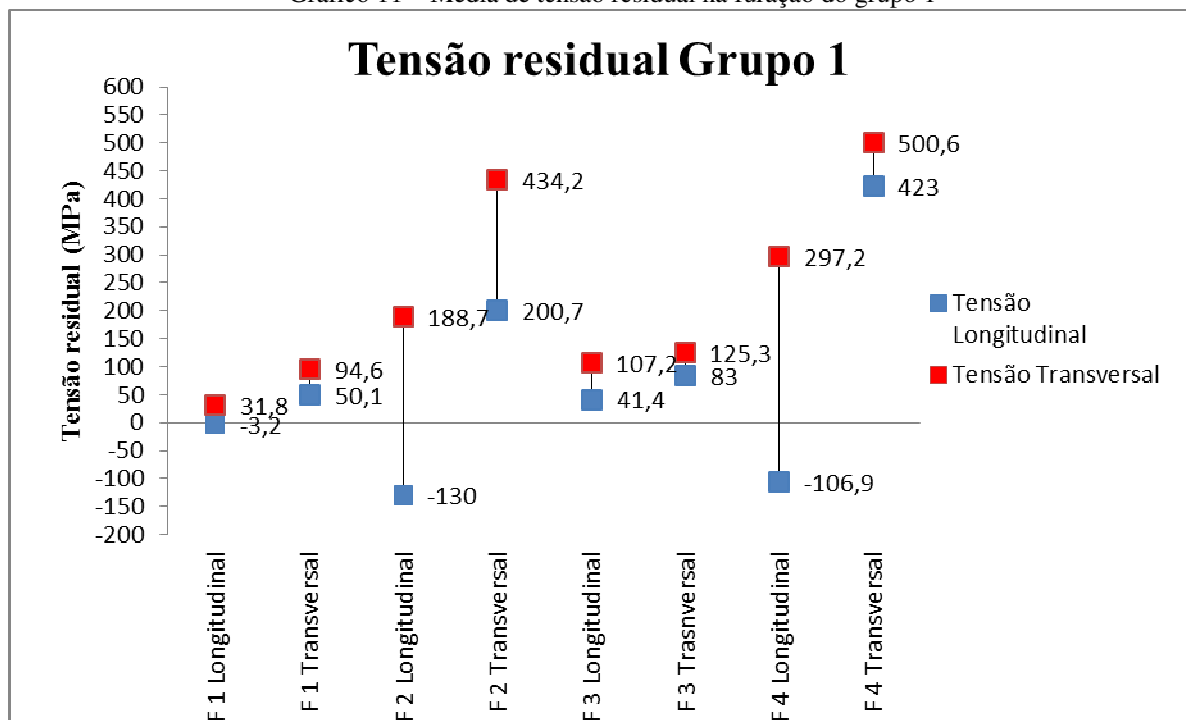
Fonte: o autor.

Na avaliação dos resultados obtidos, no sentido transversal manteve-se entre 340 a 365Mpa, caracterizando tensões trativas. Para a condição longitudinal, a variação é 168 a 298Mpa, apresentando variação ao longo das amostras. Ambos os resultados são trativos, caracterizam a o process de obtenção do material, que geralmente por laminação, proporciona a tensão trativa e por ser uma caracterísiticas de perfis retangulares. A tempertura da laminação, sentido de acomodação dos grãos, são fatroes que elevam a tensão residual na maioria de perfis tubulares, mantendo tensões residuais trativas. A realização de operações com ou sem remoção de cavaco tendem a reduzir a intensidade das tensões melhorando as propriedades dos materiais e justificando sua aplicação em detemrinas solictações.

4.6.1 Análise de tensão residual no grupo 1

A avaliação de tensão residual no grupo 1 foi respeitado a mesma metodologia do metal base coletando os resultados em 4 furos distintos ao longo do perfil furado. Os resultados são apresentados no gráfico 11, sendo o resultado de cada furo apresentado na orientação longitudinal (L) e transversal (T), com o menor e maior valor de cada amostra, verificando a possível alteração das tensões após ensaios realizados.

Gráfico 11 – Média de tensão residual na furação do grupo 1



Fonte: o autor.

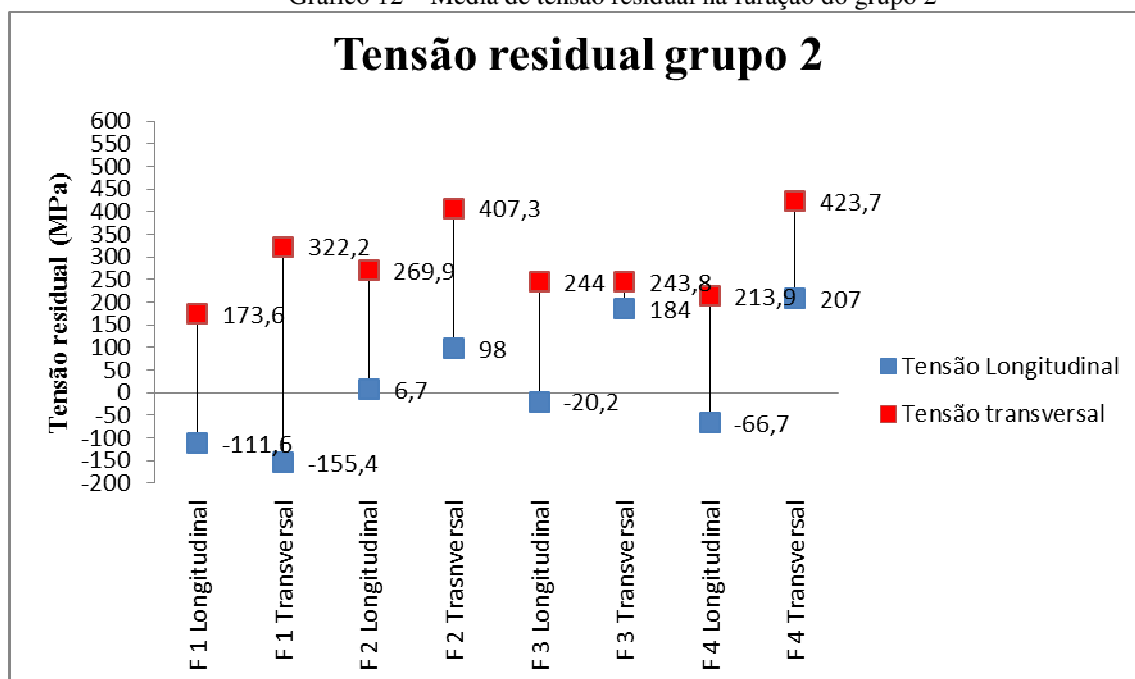
Nos resultados das amostras representam as tensões inferior e superior na orientação longitudinal e transversal em cada furo. Comparando com o metal base, os valores sofreram alterações muito variadas, pois nos furo 1,2 e 3, há redução dos valores em relação ao metal base, porém de forma sazonal no decorrer da furação. Já no furo 4, resulta em tensões reativamente diferentes ao metal base e aos demais furos, podendo ser caracterizado pela concentração de temperatura nos ensaios.

De forma geral, os resultados avaliados e em comparação com os valores do metal base, mostram concentrações de tensões variáveis, o que poderá comprometer a aplicação de peças furadas por fricção quando da utilização dos parâmetros aplicados para os ensaios. Havendo a necessidade de uso em aplicações que apresentem vibrações e fadiga, poderá comprometer a estrutura do material e dos furos em virtude da variação de tensões apresentadas.

4.7.2- Análise de tensão residual no grupo 2

No grupo 2, foram avaliados os resultados aplicando-se a mesma metodologia no metal base e grupo 1, sendo os resultados apresentados no gráfico 12, com as orientações longitudinal (L) e transversal (T), com o menor e maior valor de cada amostra, avaliando a possibilidade de alteração das tensões após ensaios realizados.

Gráfico 12 – Média de tensão residual na furação do grupo 2



Fonte: o autor.

Comparando com o metal base, os resultados ao longo dos furos longitudinal e transversal alteraram as tensões, caracterizando que a operação realizada tende a modificar as tensões do metal base. Em comparação ao grupo 1, onde os parâmetros são maiores, a influência da operação reduziu ao longo dos furos avaliados de forma nivelada, ou seja, reduziu proporcionalmente em cada furo as tensões sem alterações dentro de uma faixa das amostras no grupo 1.

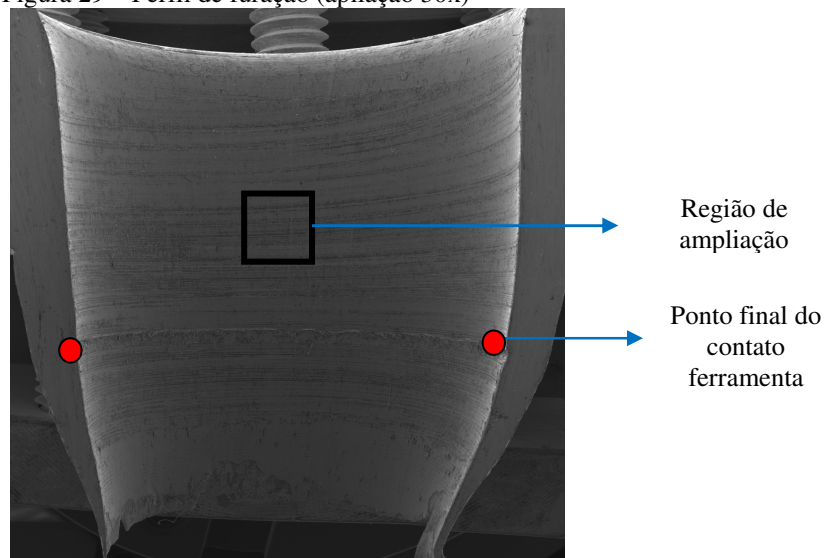
Para o metal base, as tensões transversais (T), asseguram a possibilidade de aplicação do material, pois os resultados são baixos em relação aos valores do metal base. No sentido longitudinal (L), as tensões são menores, pois na mesma proporção do sentido transversal, (T), acompanham as alterações.

Nesta condição, o material após a realização da furação é possível recomendar a aplicação em ambientes sujeitos a vibrações e condições de fadiga, pois a alteração das tensões residuais sendo modificadas com valores negativos e inferiores ao metal base, asseguram a vida do material para aplicações futuras.

4.7 RESULTADOS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A aplicação do ensaio de microscopia eletrônica de varredura permite a visualização da textura do furo resultante pela ação da ferramenta durante a furação. A superfície do furo apresenta a rugosidade obtida como as linhas em que a ferramenta avançou durante a operação. Na figura 29 é apresentada a superfície e a bucha escoada.

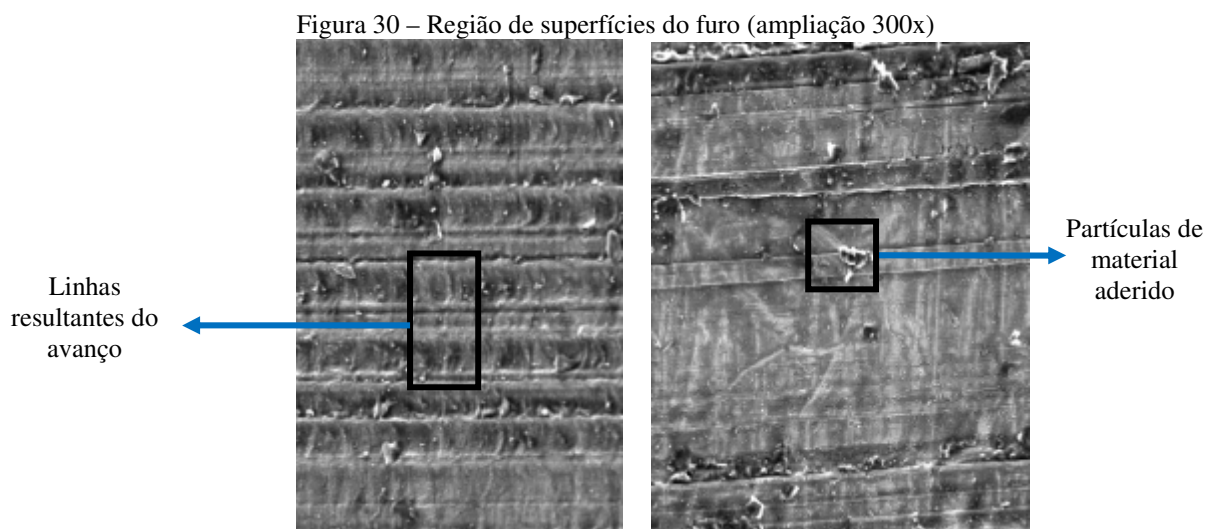
Figura 29 – Perfil de furação (ampliação 30x)



Fonte: o autor.

Na avaliação do furo verifica-se o ponto em que o comprimento do corpo da ferramenta atinge o limite de profundidade na furação. Na parte final da bucha escoada a conicidade do furo a 8mm da face, o que não interfere na aplicação da bucha escoada, pois a espessura da bucha reduz ao longo do seu comprimento.

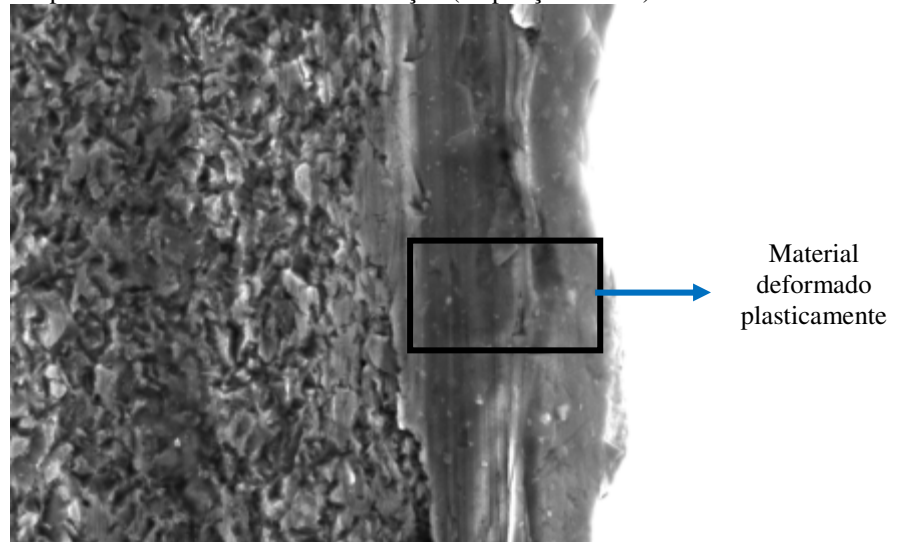
Para avaliação da textura, foi ampliada um região com o propósito de identificar e visualizar a presença de partículas de material depositado pela ação da ferramenta ao longo do deslocamento na furação. A figura 30 (abaixo) apresenta parte da região do furo com ampliação em 300x, usada para avaliar a presença de partículas de material escoado.



Fonte: o autor.

O movimento de translação da ferramenta com o material plástico conforma as laterais do furo fazendo com parte do material quecido seja aderido nas laterais do furo. Também, esta porção interfere na rugosidade do furo, que formam uma ondulação ao longo do perfil. Por ser um processo a seco, a rugosidade tende a ser maior pela adesão de material e em relação ao avanço usado. Os gumes da ferramenta em rotação em contato com o material plástico também podem contribuir para a aderência de material nas laterais dos furos.

Figura 31 – Superfície do furo resultante na furação (ampliação 4000x)



Fonte: o autor

Na figura 31 (acima), a espessura de material aderido ao longo do furo foi 0,122mm. Esta camada sendo plásticamente deformada e com a estrutura modificada não apresentou alteração na micro dureza conforme análise já caracterizada no estudo. A camada deformada influencia diretamente na rugosidade pois apresenta ondulações. Na sequência, a região afetada pela temperatura onde não apresenta alteração na estrutura ao longo do perfil. Tradicionalmente, materiais quando expostos a altas temperaturas alteram sua estrutura. No aço LN 700, verifica-se que após a camada de material aderido onde a estrutura manteve-se com poucas alterações na sua estrutura, apenas com formação de ferrita de *Widmanstätten* conforme considerações já destacadas anteriormente.

5 CONCLUSÃO

Com o estudo realizado foi possível caracterizar o comportamento do aço LN 700 após furação por fricção a seco com ferramenta de metal duro UK 40. Com dois grupos definidos para avaliação onde os parâmetros são diferentes, a caracterização possibilitou diferenciar e comparar resultados entre si, permitindo a recomendação para aplicação na indústria. Os resultados de circularidade, comprimento da bucha escoada, microdureza, região afetada pela temperatura, rugosidade e tensão residual possibilitaram caracterizar e avaliar o comportamento do material em estudo.

- a) Nos ensaios de circularidade, os dois grupos apresentaram valores próximos à dimensão de 10,90mm definidos na dimensão da ferramenta, permitindo à aplicação em ambas às condições mesmos sendo parâmetros diferentes aplicados na furação. Para aplicações futuras, onde será efetuado o corte de rosca, ambos os grupos atendem a condição;
- b) No comprimento das buchas escoadas, onde as medidas variaram de 7,07 no grupo 1 e 7,51 para o grupo 2, ambos os comprimentos obtidos permitem a utilização. Pela análise estatística não há variações entre grupos, pois a importância do comprimento da bucha escoada é aumentar a quantidade de filetes de rosca após o processo de laminação;
- c) Na avaliação de microdureza do material os resultados mostraram-se próximos aos valores do metal base, na região afetada e bucha escoada, estimavam-se alterações significativas, o que não ocorreu, justificando que o material quando submetido a furação a seco, a dureza não é alterada. Na comparação entre grupos e entre as regiões avaliadas, ambos os grupos não alteram a microdureza do material. Por serem diferenciados pelos parâmetros, em especial no grupo 2 os resultados foram mais próximos, ou seja, ocorreu pouca variação entre as amostras;
- d) Para a rugosidade entre os grupos, onde a rugosidade mensurada estava diretamente associada aos parâmetros usados e em relação ao material aderido nas laterais dos furos, os dois grupos atendem a condição de rugosidade, pois na avaliação estatística não apresentam diferenças entre si. Por serem diretamente diferentes na rotação e avanço, seria possível haver grande diferença, o que não ocorreu. Desta forma, qualquer condição poderá ser aplicada que resultará em rugosidade dentro do parâmetro avaliado;

- e) A tensão residual interpretada como trativa e compressiva justifica a aplicação do material após a operação realizada na peça. Na comparação entre metal base com amostras de furos dos grupos avaliados, resultados apresentados de tensão residual no grupo 1, reduzem em relação ao metal base, porém de maneira que não apresentaram resultados compressivos significantes. Já para o grupo 2, ao longo das amostras, as tensões compressivas são expressantes, ou seja, negativas, o que permite com maior segurança sua aplicação permitindo a aplicação em situações de vibração e fadiga.

A caracterização do processo de furação por fricção a seco no aço LN 700 e a avaliação dos resultados entre grupos por meio de análise estatística permitiu confrontar os dois grupos nas variadas situações e mostrar que a realização da pesquisa assegura a aplicação do processo na indústria. Entre todos os resultados avaliados o fator que mais impacta é a tensão residual, que nesta pesquisa, o grupo 2 apresentou resultados melhores para o material em estudo.

6 ESTUDOS RELACIONADOS

Com o objetivo de validar o estudo realizado, foram confrontados trabalhos direcionados à furação por fricção, para verificar oportunidades de estudos futuros na área.

Cardoso (2008), aplicou furação por escoamento em chapas finas de aço carbono SAE 1020 com o propósito de realizar furos de diâmetro de 7,3mm para posterior corte de rosca M8. Neste estudo, foram avaliadas duas condições: 1) condições do processo, onde houve a alteração de velocidade de rotação, avanço, com a finalidade avaliar a força, momento torçor, geometria da bucha e resistência a tração; 2) transformações microestruturais da peça, por meio a análise metalográfica de microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura, microdureza e região afetada pela temperatura.

Nardi (2012), realizou furação por fricção em chapas de aço *dual phase* com espessura de 1,2, 1,6 e 2,0mm com e sem cobertura nas chapas. Durante a furação, analisou as forças atuantes durante os estágios de avanço da ferramenta, com variações de rotação e avanço. Posteriormente, foi realizada metalografia do material relacionando alterações microestruturais resultantes da temperatura da furação. Um ponto diferenciado no estudo foi à determinação de absorção de calor concentrado na peça durante os ensaios com o objetivo de definir a melhor condição dos parâmetros em relação à temperatura causada no processo.

Os trabalhos mencionados direcionaram para duas condições com alterações de parâmetros durante a furação, e avaliação comportamental da furação. Em ambas as condições usou-se ferramenta de metal duro, porém sem avaliação do desgaste da ferramenta.

O estudo realizado com aço LN 700 foi direcionado na caracterização do comportamento do material após furação por fricção a seco, onde os procedimentos adotados para análise foi com a definição de parâmetros (rotação e avanço) diferenciados em grupos para avaliar o comportamento do material. A tensão residual resultante do processo de furação foi aplicada com alternativa para diferenciar os grupos, facilitando a recomendação para futuras aplicações do material.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A aplicação da furação por fricção possui vários aspectos a serem estudados. Alguns fatores observados durante a realização deste trabalho podem ser considerados para trabalhos futuros:

- a) Determinação da temperatura durante a furação, com o emprego de termopares para avaliar a temperatura da peça, como na ferramenta;
- b) Variação de parâmetros de furação, rotação, avanço, para determinar comportamento microestrutural do material em altas rotações e avanços;
- c) Avaliação microestrutural do material e operação com uso de MQL, a seco e com pasta mecânica, com análise da ferramenta e material;
- d) Determinação da vida da ferramenta, desgaste, aderência, perda de revestimento, auxiliando em estudos de durabilidade;
- e) Comparação de revestimentos de ferramenta na furação a seco, com MQL e pasta mecânica, para analisar melhor cobertura a ser aplicada em ferramentas;
- f) Modificação da geometria da ferramenta, com inserção de aresta de corte no colar, com o propósito da retirada da anilha, formando escareado para corte de rosca;
- g) Análise da tensão residual no aço LN 700 submetido à furação a seco, com MQL e com pasta mecânica após furação por fricção.

De forma geral, o estudo é o início dos estudos na caracterização do comportamento do aço LN 700 submetido a furação por fricção. Por ser um tema relativamente específico aplicado em situações específicas, necessita que a continuidade da pesquisa está diretamente associada à evolução da tecnologia para a sociedade, pois permite alcançar novos objetivos para a vida acadêmica como a segurança da aplicação do material, processo e novas ferramentas no mercado.

REFERENCIAS

ABOUEI, V. et al. An investigation of the wear behaviour of 0.2% C dual phase steels. **Journal of materials processing technology**, v. 203, n. 1, p. 107-112, 2008.

BHADESHIA H. K. D. H. Material factors. In: _____ Handbook of residual stress and deformation of stell. ASM Internationa, Ohio, 2002.

CARDOSO JR, Ronaldo. Soldagem de aços de extra-alta resistência: o que são e por que utilizá-los. **Revista Solução**, ESAB, n. 10, p. 37-39, 2008. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/revista_solucao/upload/solu%C3%A7%C3%A3o-outubro>. Acesso em: 15 maio 2015.

grain structures in HSLA steels. **Materials characterization**, v. 58, n. 5, p. 423-438, 2007.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos processos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

CHOW, Han-Ming; LEE, Shin-Min; YANG, Lieh-Dai. Machining characteristic study of friction drilling on AISI 304 stainless steel. **Journal of materials processing technology**, v. 207, n. 1, p. 180-186, 2008.

DREIER; Steven; DENKENA, Berend. **Determination of residual stresses in plate material by layer removal with machine-integrated measurement**. Germany, 2014. p. 103-107.

FRITZPATRICK M. E.; FRY A. T. Determination of residual stresses by x-ray diffraction. **Measurement Good Practice Guide**, UK, v.2, n. 52, No 52, 2005.

GORNI, Antonio Augusto. Estudo traça relações entre microestrutura e propriedades mecânicas em aços estruturais. **Corte e Conformação de Metais**, v. 3, n. 35, p. 100-10, 2008.

KU, Wei-Liang et al. Optimization in thermal friction drilling for SUS 304 stainless steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 53, n. 9-12, p. 935-944, 2011.

LEE *et al.* Machining characteristic study of friction drilling on AISI 304 stainless steel, **Journal of mat. proc. tech.**, v. 207,p. 81-88, 2008.

LEE, T. L. et al. Characterization of the residual stresses in spray-formed steels using neutron diffraction. **Scripta Materialia**, v. 100, p. 82-85, 2015.

LU, JIAN; SOCIETY for experimental mechanics. Handbook of mesasurement of residual stresses. NJ: Fairmont Press, 1996.

MILLER, Scott F.; TAO, Jia; SHIH, Albert J. Friction drilling of cast metals.**International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 12, p. 1526-1535, 2006.

MILLER, Scott F.; BLAU, Peter J.; SHIH, Albert J. Tool wear in friction drilling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 10, p. 1636-1645, 2007.

NARDI, D.; LÓPEZ DE LACALLE, L. N.; LAMIKIZ, A. Taladrado por fricción en aceros de doble fase. **Revista de metalurgia**, v. 48, n. 1, p. 13-23, 2012.

NARDI, D., LACALLE, L. N. L.; FERNÁNDEZ, Asier. Taladrado por fricción en aceros de doble fase de alta resistència. 2011. 92 f. Tese (Doutorado). Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, 2011.

OZEK, Cebeli; DEMIR, Zulkuf. Investigate the Friction Drilling of Aluminium Alloys According to the Thermal Conductivity. **Tem Journal Technology Education Management Informatics**, v. 2, p. 93-101, 2013.

OZLER, Latif; DOGRU, Nulifer. An experimental investigation of hole geometry in friction drilling. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 28, n. 4, p. 470-475, 2013.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. 2^a ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

VEMANABOINA, Harinadh; AKELLA, Suresh; BUDDU, Ramesh Kumar. Welding Process Simulation Model for Temperature and Residual Stress Analysis. **Procedia Materials Science**, v. 6, p. 1539-1546, 2014.

8 ANEXOS

8.1 ANEXO 1 – TABELA DE DADOS DE MICRODUREZ VICKERS GRUPO 1

Tabela 1 – Resultados de microdureza obtidos com parâmetros grupo 1

| | Metal Base | | | | | | Região afetada | | | Região da rebarba | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------|---------|---------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | ponto1 | Ponto 2 | ponto 3 | ponto 4 | ponto 5 | ponto 6 | ponto 7 | ponto 8 | ponto 9 | ponto 10 | ponto 11 | ponto 12 | ponto 13 | ponto 14 | ponto 15 | ponto 16 | ponto 17 | ponto 18 | ponto 19 | ponto 20 | ponto 21 | ponto 22 | ponto 23 | ponto 24 | ponto 25 | ponto 26 | ponto 27 |
| 1 | 263 | 273 | 276 | 278 | 271 | 258 | 277 | 250 | 238 | 245 | 286 | 263 | 309 | 292 | 263 | 261 | 280 | 294 | 287 | 271 | 253 | 243 | 243 | 233 | 243 | 244 | 224 |
| 2 | 208 | 277 | 297 | 288 | 280 | 291 | 296 | 274 | 264 | 246 | 303 | 267 | 306 | 282 | 265 | 292 | 291 | 275 | 274 | 266 | 268 | 269 | 263 | 268 | 266 | 266 | 257 |
| 3 | 294 | 298 | 283 | 291 | 282 | 283 | 293 | 295 | 272 | 260 | 300 | 279 | 287 | 286 | 282 | 298 | 300 | 235 | 302 | 289 | 288 | 282 | 280 | 277 | 267 | 277 | 282 |
| 4 | 262 | 265 | 289 | 291 | 294 | 295 | 320 | 272 | 271 | 279 | 279 | 291 | 273 | 264 | 292 | 288 | 295 | 284 | 269 | 250 | 249 | 241 | 252 | 224 | 207 | 193 | 271 |
| 5 | 311 | 297 | 309 | 294 | 288 | 280 | 293 | 276 | 263 | 271 | 279 | 267 | 300 | 395 | 398 | 285 | 300 | 318 | 307 | 297 | 293 | 274 | 298 | 288 | 274 | 290 | 280 |
| 6 | 315 | 293 | 307 | 309 | 309 | 395 | 313 | 302 | 289 | 289 | 317 | 310 | 322 | 295 | 288 | 284 | 319 | 301 | 290 | 278 | 279 | 289 | 291 | 301 | 291 | 291 | 279 |
| 7 | 337 | 346 | 303 | 301 | 315 | 316 | 313 | 304 | 302 | 278 | 284 | 295 | 294 | 285 | 274 | 288 | 273 | 301 | 289 | 285 | 293 | 325 | 306 | 289 | 372 | 376 | 311 |
| 8 | 289 | 298 | 284 | 289 | 301 | 323 | 327 | 281 | 262 | 264 | 275 | 287 | 289 | 292 | 307 | 282 | 288 | 300 | 288 | 279 | 292 | 295 | 296 | 308 | 273 | 269 | 262 |

Fonte: o autor.

8.2 ANEXO 2 – TABELA DE DADOS DE MICRODUREZA VICKERS GRUPO 2

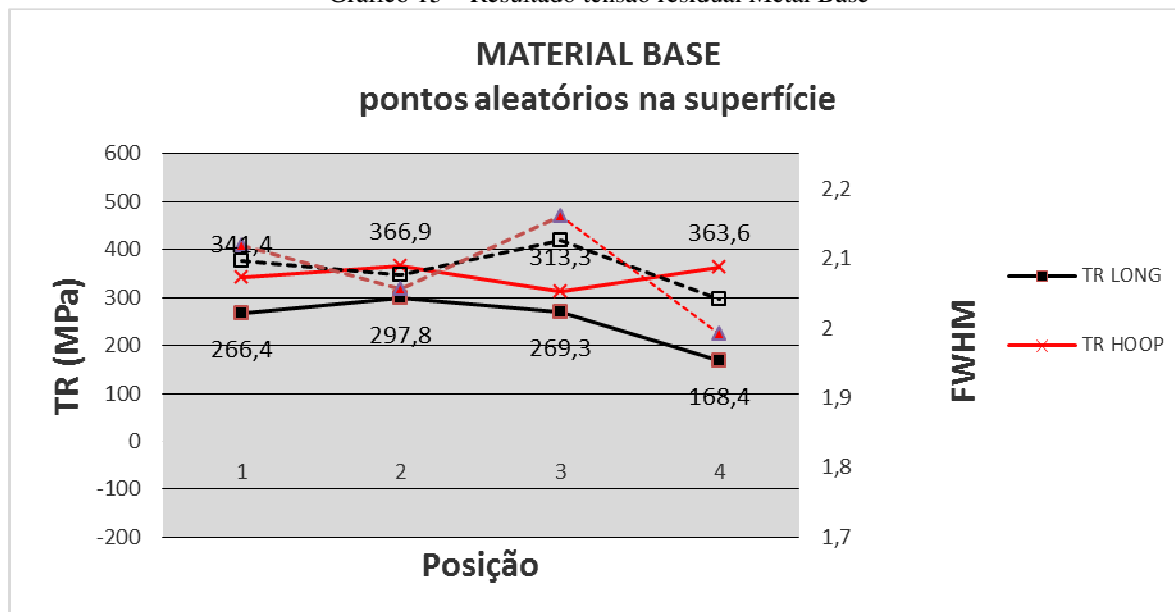
Tabela 2 – Resultados de microdureza obtidos com parâmetros grupo 2

| | Metal Base | | | | | | Região afetada | | | Região da rebarba | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------|---------|---------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | ponto1 | Ponto 2 | ponto 3 | ponto 4 | ponto 5 | ponto 6 | ponto 7 | ponto 8 | ponto 9 | ponto 10 | ponto 11 | ponto 12 | ponto 13 | ponto 14 | ponto 15 | ponto 16 | ponto 17 | ponto 18 | ponto 19 | ponto 20 | ponto 21 | ponto 22 | ponto 23 | ponto 24 | ponto 25 | ponto 26 | ponto 27 |
| 1 | 314 | 318 | 316 | 318 | 328 | 333 | 292 | 300 | 308 | 299 | 312 | 321 | 313 | 301 | 304 | 309 | 305 | 295 | 298 | 305 | 308 | 295 | 301 | 308 | 285 | 304 | 273 |
| 2 | 333 | 327 | 328 | 313 | 326 | 331 | 331 | 317 | 297 | 286 | 296 | 302 | 302 | 316 | 298 | 307 | 304 | 316 | 327 | 321 | 300 | 292 | 299 | 303 | 307 | 320 | 315 |
| 3 | 322 | 325 | 320 | 321 | 314 | 330 | 338 | 308 | 300 | 303 | 306 | 328 | 320 | 302 | 309 | 321 | 322 | 313 | 315 | 322 | 307 | 299 | 323 | 306 | 309 | 305 | 305 |
| 4 | 324 | 316 | 317 | 321 | 311 | 305 | 347 | 322 | 301 | 293 | 324 | 219 | 257 | 341 | 322 | 316 | 317 | 312 | 301 | 309 | 308 | 291 | 303 | 308 | 315 | 307 | 308 |
| 5 | 311 | 297 | 309 | 294 | 288 | 280 | 293 | 276 | 263 | 271 | 279 | 267 | 300 | 295 | 298 | 281 | 300 | 318 | 307 | 297 | 293 | 274 | 298 | 288 | 274 | 290 | 280 |
| 6 | 272 | 273 | 268 | 271 | 280 | 293 | 292 | 275 | 273 | 273 | 284 | 296 | 298 | 302 | 301 | 292 | 282 | 292 | 288 | 281 | 274 | 272 | 296 | 276 | 281 | 283 | 271 |
| 7 | 260 | 258 | 253 | 277 | 280 | 274 | 292 | 297 | 260 | 260 | 269 | 276 | 266 | 266 | 261 | 268 | 287 | 265 | 278 | 234 | 279 | 298 | 284 | 265 | 331 | 432 | 361 |
| 8 | 229 | 232 | 233 | 246 | 267 | 236 | 243 | 262 | 249 | 249 | 247 | 255 | 249 | 242 | 251 | 255 | 249 | 245 | 239 | 233 | 232 | 226 | 224 | 226 | 244 | 260 | 264 |

Fonte: o autor.

8.3 ANEXO 3 – RESULTADOS DE TENSÃO RESIDUAL

Gráfico 13 – Resultado tensão residual Metal Base



Fonte: o autor.

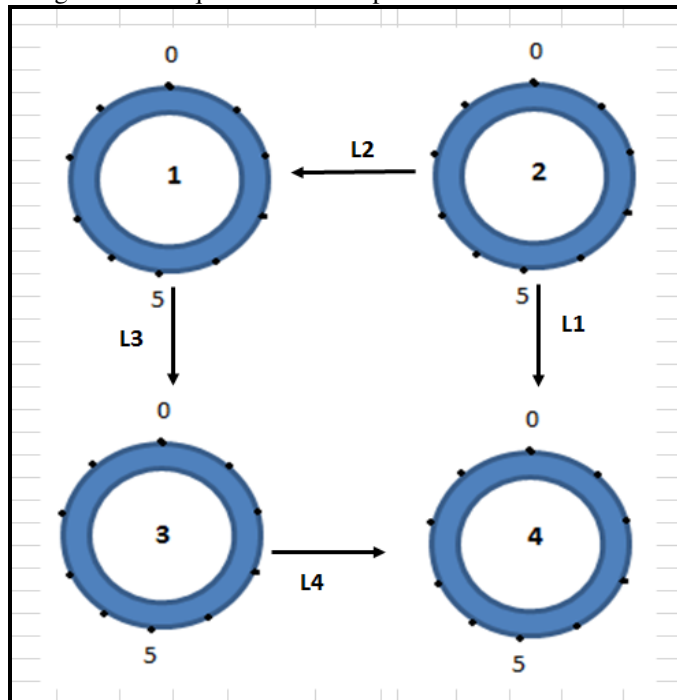
Tabela 3 – Valores tensão residual metal base

| LONGITUDINAL | | | | | TRANSVERSAL | | | | |
|--------------|-------|------|------|--------|-------------|-------|------|------|--------|
| PTO | TR | INC | TAU | FWHM | PTO | TR | INC | TAU | FWHM |
| 0 | 266,4 | 14,1 | 8,58 | 2,0968 | 4 | 341,4 | 15,8 | 13,5 | 2,1176 |
| 1 | 297,8 | 15,1 | 7,3 | 2,0758 | 5 | 366,9 | 18 | 13,1 | 2,0552 |
| 2 | 269,3 | 24 | 9,8 | 2,1262 | 6 | 313,3 | 21,8 | 11,8 | 2,1612 |
| 3 | 168,4 | 15,5 | 4,8 | 2,0404 | 7 | 363,6 | 13,5 | 10,6 | 1,9915 |

Fonte: o autor.

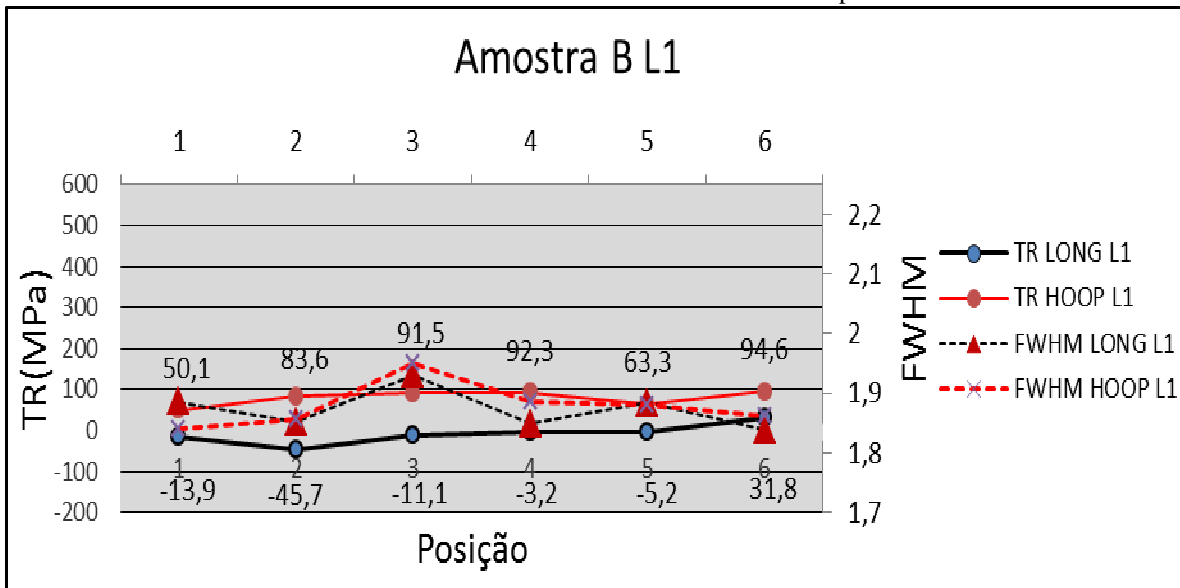
8.4 ANEXO 4 – RESULTADOS DE TENSÃO RESIDUAL GRUPO 1

Figura 32 – Sequência definida para análise tensão residual



Fonte: o autor.

Gráfico 14 – Resultado tensão residual furo 1 Grupo 1



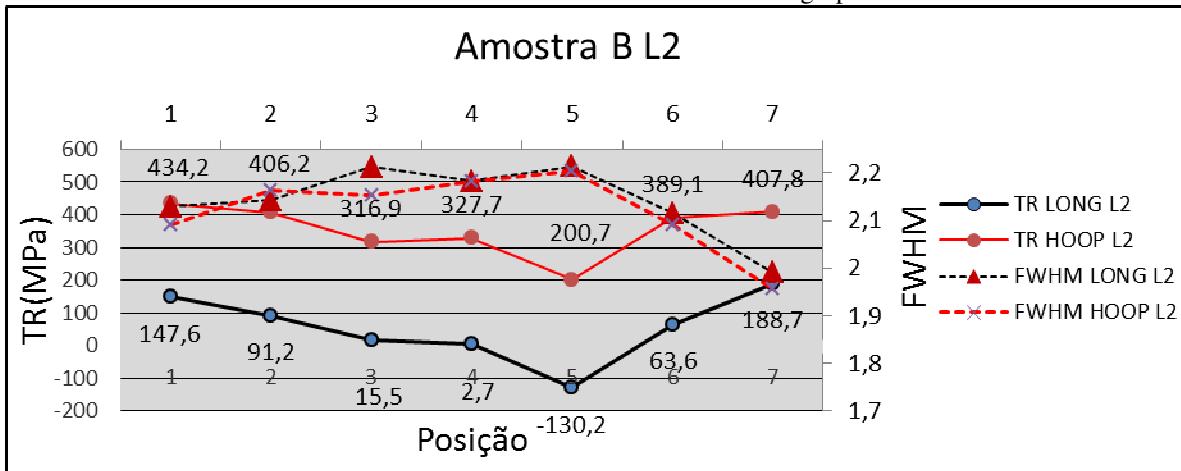
Fonte: o autor.

Tabela 4 – Valores tensão residual furo 1 grupo 1

| LONGITUDINAL | | | | | | TRANSVERSAL | | | | | |
|--------------|-------|------|------|--------|-------|-------------|------|------|------|--------|-------|
| PTO | TR | INC | TAU | FWHM | LINHA | PTO | TR | INC | TAU | FWHM | LINHA |
| 0 | -13,9 | 14,4 | 0,4 | 1,8857 | 1 | 6 | 50,1 | 16,1 | 0,2 | 1,8393 | 1 |
| 1 | -45,7 | 14,9 | -0,4 | 1,852 | 1 | 7 | 83,6 | 13,8 | -1,1 | 1,8565 | 1 |
| 2 | -11,1 | 15,8 | 0,4 | 1,931 | 1 | 8 | 91,5 | 19,6 | -0,9 | 1,9499 | 1 |
| 3 | -3,2 | 13,8 | 1,9 | 1,8484 | 1 | 9 | 92,3 | 13,6 | -0,2 | 1,8862 | 1 |
| 4 | -5,2 | 12,8 | 2,3 | 1,8845 | 1 | 10 | 63,3 | 14,4 | -0,2 | 1,8805 | 1 |
| 5 | 31,8 | 15,1 | 2,4 | 1,8378 | 1 | 11 | 94,6 | 13,5 | 1,7 | 1,8619 | 1 |

Fonte: o autor.

Gráfico 15 – Resultado tensão residual furo 2 grupo 1



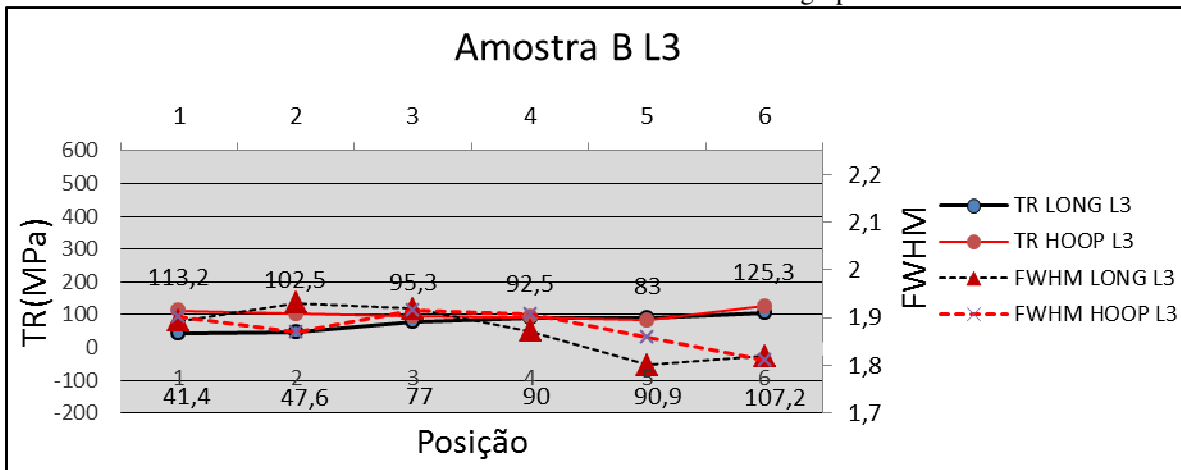
Fonte: o autor.

Tabela 5 – Valores tensão residual furo 2 grupo 1

| | | | | | | | | | | | |
|----|-------|------|-----|--------|---|----|-----|------|------|--------|---|
| 12 | 147,6 | 14,5 | 2 | 2,1289 | 2 | 19 | 434 | 22,3 | -3,3 | 2,091 | 2 |
| 13 | 91,2 | 14,1 | 2,1 | 2,1425 | 2 | 20 | 406 | 26,1 | -3,3 | 2,1639 | 2 |
| 14 | 15,5 | 16,2 | 5,2 | 2,2123 | 2 | 21 | 317 | 25,6 | -1,5 | 2,1536 | 2 |
| 15 | 2,7 | 26,9 | 3,8 | 2,1835 | 2 | 22 | 328 | 21,2 | -0,2 | 2,1837 | 2 |
| 16 | 130,2 | 22,7 | 3,9 | 2,2136 | 2 | 23 | 201 | 19,1 | -0,2 | 2,2027 | 2 |
| 17 | 63,6 | 14,8 | 3,4 | 2,1165 | 2 | 24 | 389 | 24,6 | -1,3 | 2,0913 | 2 |
| 18 | 188,7 | 16,4 | 2,4 | 1,99 | 2 | 25 | 408 | 16,9 | 0,7 | 1,9562 | 2 |

Fonte: o autor.

Gráfico 16 – Resultado tensão residual furo 3 grupo 1



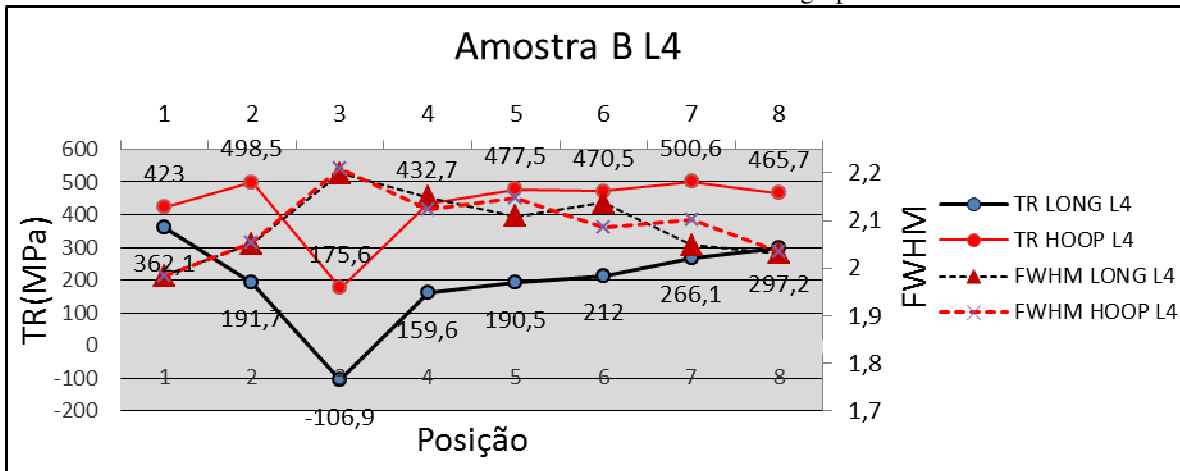
Fonte: o autor.

Tabela 6 – Valores tensão residual furo 3 grupo 1

| | | | | | | | | | | | |
|----|-------|------|------|--------|---|----|------|------|------|--------|---|
| 26 | 41,4 | 16,3 | 1,1 | 1,893 | 3 | 32 | 113 | 12,4 | -1,5 | 1,9032 | 3 |
| 27 | 47,6 | 20,7 | 1,4 | 1,9313 | 3 | 33 | 103 | 12,6 | -0,7 | 1,869 | 3 |
| 28 | 77 | 18 | -3,6 | 1,9182 | 3 | 34 | 95,3 | 13,5 | -0,6 | 1,916 | 3 |
| 29 | 90 | 12 | -0,1 | 1,8714 | 3 | 35 | 92,5 | 21,4 | -0,6 | 1,9074 | 3 |
| 30 | 90,9 | 17,1 | -0,2 | 1,8009 | 3 | 36 | 83 | 12,7 | -1,4 | 1,8597 | 3 |
| 31 | 107,2 | 14,6 | -1,5 | 1,8198 | 3 | 37 | 125 | 19,4 | 0 | 1,81 | 3 |

Fonte: o autor.

Gráfico 17 – Resultado tensão residual furo 4 grupo 1



Fonte: o autor.

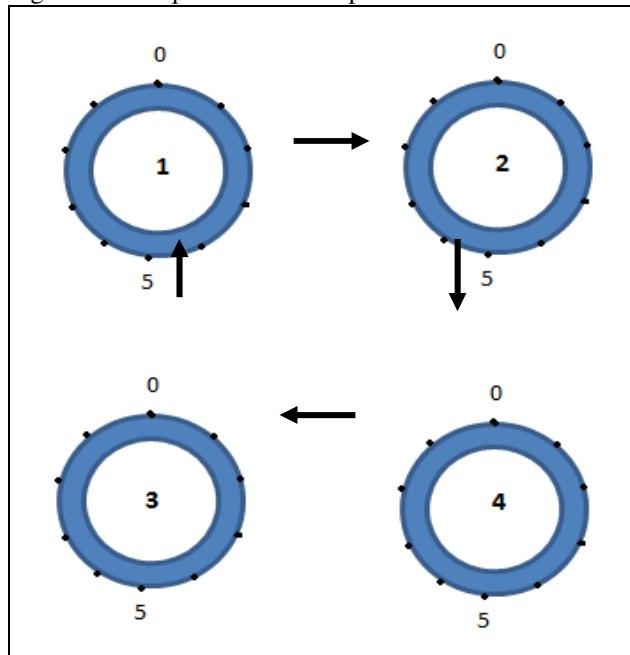
Tabela 7 – Valores tensão residual furo 4 grupo 1

| | | | | | | | | | | | |
|----|-------|------|------|--------|---|----|-----|------|------|--------|---|
| 38 | 362,1 | 10,9 | -0,4 | 1,9838 | 4 | 46 | 423 | 20,5 | 5,8 | 1,9822 | 4 |
| 39 | 191,7 | 12,8 | 2 | 2,051 | 4 | 47 | 499 | 20,8 | -3,9 | 2,0526 | 4 |
| 40 | 106,9 | 19,6 | 1,2 | 2,1993 | 4 | 48 | 176 | 15,3 | -0,7 | 2,2099 | 4 |
| 41 | 159,6 | 13,3 | 1,2 | 2,15 | 4 | 49 | 433 | 14,5 | -3,7 | 2,1219 | 4 |
| 42 | 190,5 | 24,8 | 3,5 | 2,1091 | 4 | 50 | 478 | 14,6 | -5 | 2,1467 | 4 |
| 43 | 212 | 15,5 | 1,9 | 2,1379 | 4 | 51 | 471 | 20,7 | -4,8 | 2,0845 | 4 |
| 44 | 266,1 | 15,6 | 0,5 | 2,0492 | 4 | 52 | 501 | 15,2 | -4,4 | 2,1007 | 4 |
| 45 | 297,2 | 13,5 | 1,6 | 2,0305 | 4 | 53 | 466 | 21,5 | -6,4 | 2,0351 | 4 |

Fonte: o autor.

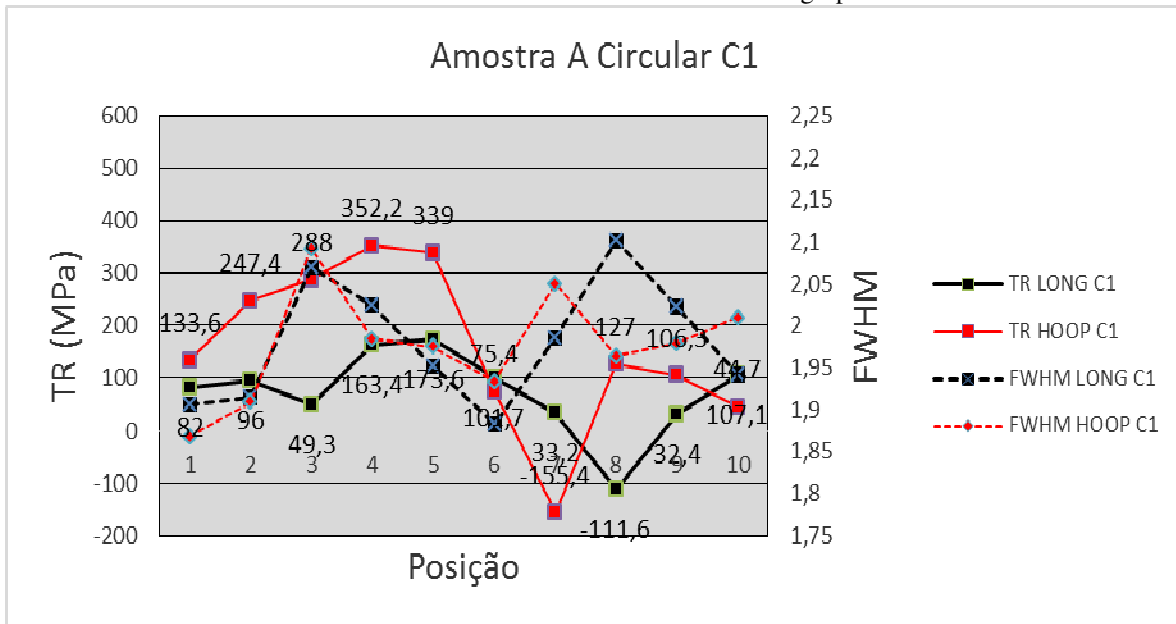
8.5 ANEXO 5 – RESULTADO TENSÃO RESIDUAL GRUPO 2

Figura 33 – Sequência definida para análise tensão residual



Fonte: o autor.

Gráfico 18 – Resultado tensão residual furo 1 grupo 2



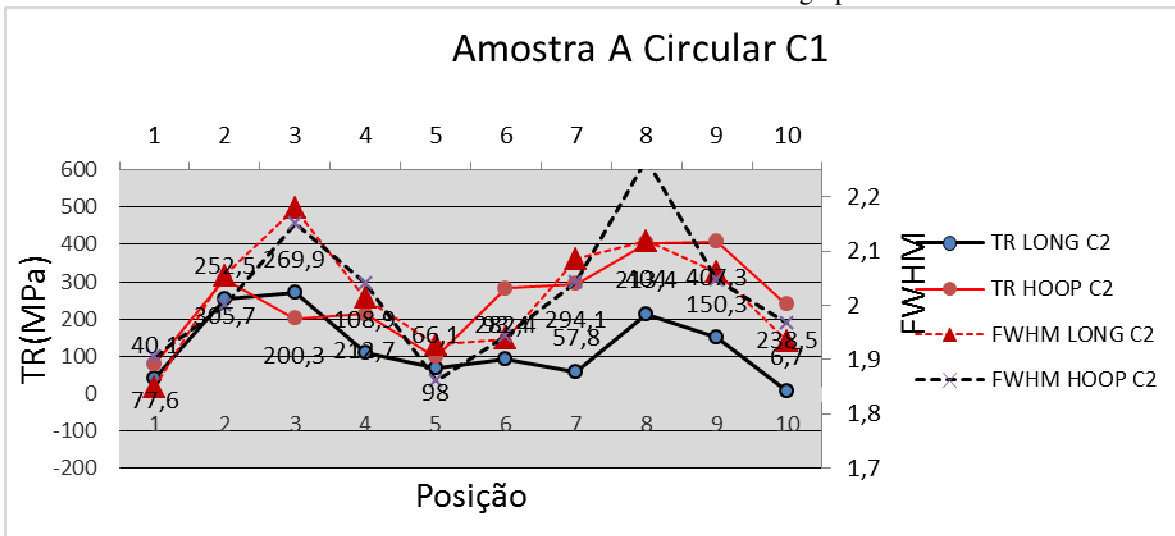
Fonte: o autor.

Tabela 8 –Valores tensão residual furo 1 grupo 2

| LONGITUDINAL C1 | | | | | TRANSVERSAL C1 | | | | |
|-----------------|--------|------|------|--------|----------------|--------|------|------|--------|
| PTO | TR | INC | TAU | FWHM | PTO | TR | INC | TAU | FWHM |
| 0 | 82 | 24,8 | 3,6 | 1,9058 | 0 | 133,6 | 18,3 | 1,1 | 1,8677 |
| 1 | 96 | 15,8 | 3,2 | 1,9151 | 1 | 247,4 | 17,1 | 3,3 | 1,9093 |
| 2 | 49,3 | 20,3 | -1,1 | 2,07 | 2 | 288 | 17,1 | 0,4 | 2,0922 |
| 3 | 163,4 | 23,3 | 4,2 | 2,024 | 3 | 352,2 | 11,9 | -2,6 | 1,9844 |
| 4 | 173,6 | 18,5 | 6,4 | 1,9524 | 4 | 339 | 21,2 | -1,6 | 1,9745 |
| 5 | 101,7 | 16,5 | 5,2 | 1,8829 | 5 | 75,4 | 16,7 | -0,9 | 1,9334 |
| 6 | 33,2 | 26,1 | 2,4 | 1,9845 | 6 | -155,4 | 18,6 | -0,3 | 2,0493 |
| 7 | -111,6 | 17,2 | -1,6 | 2,1016 | 7 | 127 | 18,3 | 0,3 | 1,9636 |
| 8 | 32,4 | 18,8 | 1,2 | 2,0217 | 8 | 106,3 | 16 | 0 | 1,9793 |
| 9 | 107,1 | 17 | 4,1 | 1,9416 | 9 | 44,7 | 14,5 | 0,3 | 2,0095 |

Fonte: o autor.

Gráfico 19 – Resultado tensão residual furo 2 grupo 2



Fonte: o autor.

Tabela 9 – Valores tensão residual furo 2 grupo 2

| LONGITUDINAL C2 | | | | | TRANSVERSAL C2 | | | | |
|-----------------|-------|-------|------|--------|----------------|-------|------|------|--------|
| PTO | TR | INC | TAU | FWHM | PTO | TR | INC | TAU | FWHM |
| 0 | 40,1 | 136,5 | 1,9 | 1,8482 | 0 | 77,6 | 14 | -1,5 | 1,9044 |
| 1 | 252,5 | 22,7 | 6,6 | 2,0545 | 1 | 305,7 | 16,2 | -4,8 | 2,0011 |
| 2 | 269,9 | 21,1 | 6,3 | 2,1786 | 2 | 200,3 | 16,1 | -1,1 | 2,1514 |
| 3 | 108,9 | 16,1 | 2,5 | 2,0133 | 3 | 212,7 | 19 | -1,3 | 2,0411 |
| 4 | 66,1 | 16 | 1,3 | 1,9271 | 4 | 98 | 14,4 | 5 | 1,8601 |
| 5 | 93,4 | 15,9 | -0,8 | 1,9375 | 5 | 282,4 | 16,9 | -1,1 | 1,9443 |
| 6 | 57,8 | 15,2 | -2,6 | 2,0863 | 6 | 294,1 | 13,9 | -0,3 | 2,0415 |
| 7 | 213,4 | 26 | 4,3 | 2,1191 | 7 | 404 | 17,1 | -2,5 | 2,2703 |
| 8 | 150,3 | 13,5 | 4,5 | 2,0614 | 8 | 407,3 | 18,1 | -4,1 | 2,0475 |
| 9 | 6,7 | 14,7 | 1,2 | 1,9348 | 9 | 238,5 | 19,5 | -3,5 | 1,9667 |

Fonte: o autor.

Gráfico 20 – Resultado tensão residual furo 3 grupo 2

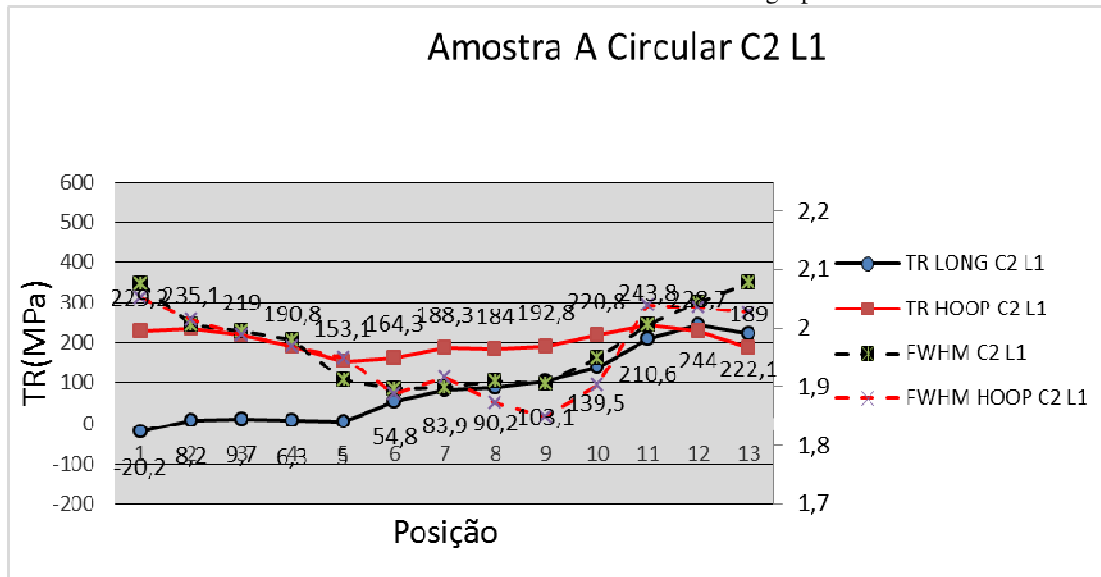
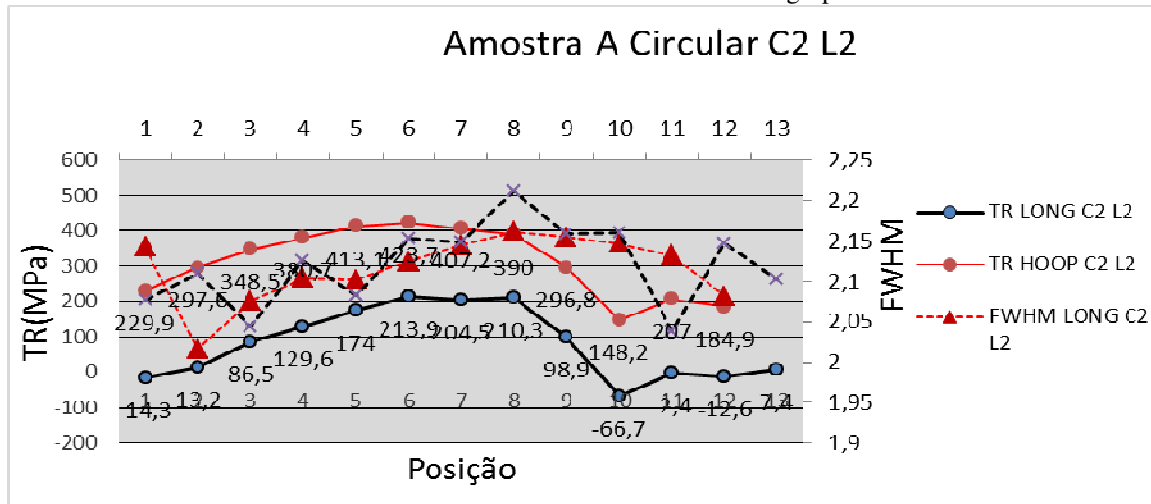


Tabela 10 – Valores tensão residual furo 3 grupo 2

| LONGITUDINAL C2 L1 | | | | | TRANSVERSAL C2 L1 | | | | |
|--------------------|-------|------|------|--------|-------------------|-------|------|------|--------|
| PTO | TR | INC | TAU | FWHM | PTO | TR | INC | TAU | FWHM |
| 20 | -20,2 | 13,3 | -2,2 | 2,0761 | 33 | 229,2 | 16,6 | -1,3 | 2,0535 |
| 21 | 8,2 | 14 | -0,3 | 2,0044 | 34 | 235,1 | 16,6 | -3,1 | 2,0149 |
| 22 | 9,7 | 11,2 | 0,9 | 1,9958 | 35 | 219 | 21,9 | -3 | 1,9889 |
| 23 | 6,3 | 12,9 | 1,5 | 1,9796 | 36 | 190,8 | 15,1 | -3,1 | 1,9696 |
| 24 | 5 | 10,3 | 2,8 | 1,9112 | 37 | 153,1 | 13,6 | -1,9 | 1,9504 |
| 25 | 54,8 | 10,8 | 1,3 | 1,8957 | 38 | 164,3 | 17,2 | -2,7 | 1,8868 |
| 26 | 83,9 | 12,1 | 2,9 | 1,8991 | 39 | 188,3 | 16 | -3,8 | 1,9147 |
| 27 | 90,2 | 13,1 | -1,1 | 1,9093 | 40 | 184 | 19 | -0,4 | 1,8728 |
| 28 | 103,1 | 9,4 | 1,1 | 1,9046 | 41 | 192,8 | 14,5 | -3,4 | 1,849 |
| 29 | 139,5 | 11,6 | 3,8 | 1,9495 | 42 | 220,8 | 16,3 | -1,5 | 1,9034 |
| 30 | 210,6 | 11,6 | 6,4 | 2,0059 | 43 | 243,8 | 14,7 | -1,7 | 2,0392 |
| 31 | 244 | 12,8 | 7,2 | 2,0439 | 44 | 228,7 | 15,1 | -1 | 2,0354 |
| 32 | 222,1 | 11,8 | 6,1 | 2,0792 | 45 | 189 | 18,9 | 0,5 | 2,0276 |

Fonte: o autor.

Gráfico 21 – Resultado tensão residual furo 4 grupo 2



Fonte: o autor.

Tabela 11 – Valores tensão residual furo 4 grupo 2

| LONGITUDINAL C2 L2 | | | | | TRANSVERSAL C2 L2 | | | | |
|--------------------|-------|------|------|--------|-------------------|-------|------|------|--------|
| PTO | TR | INC | TAU | FWHM | PTO | TR | INC | TAU | FWHM |
| 46 | -14,3 | 20,2 | -2,2 | 2,0768 | 59 | 229,9 | 19,8 | -1,6 | 2,1424 |
| 47 | 13,2 | 22,7 | 0,08 | 2,1096 | 60 | 297,6 | 16,5 | -0,7 | 2,0165 |
| 48 | 86,5 | 23,8 | -0,2 | 2,0443 | 61 | 348,5 | 22,3 | -2,3 | 2,0755 |
| 49 | 129,6 | 18,4 | 3 | 2,1256 | 62 | 380,7 | 19,4 | -3 | 2,1036 |
| 50 | 174 | 27,3 | 2,9 | 2,0823 | 63 | 413,1 | 16,1 | -1,2 | 2,1016 |
| 51 | 213,9 | 25,2 | 3,6 | 2,1529 | 64 | 423,7 | 15,7 | -2,3 | 2,1247 |
| 52 | 204,5 | 20,7 | 7 | 2,1482 | 65 | 407,2 | 16,6 | -1,6 | 2,1451 |
| 53 | 210,3 | 22,3 | 3,9 | 2,2124 | 66 | 390 | 16,2 | -0,8 | 2,1611 |
| 54 | 98,9 | 15 | 1 | 2,1583 | 67 | 296,8 | 14,6 | 0,1 | 2,1546 |
| 55 | -66,7 | 12,6 | -4 | 2,1597 | 68 | 148,2 | 14,7 | 1,1 | 2,1471 |
| 56 | -2,4 | 21 | -3 | 2,0383 | 69 | 207 | 18,3 | -0,4 | 2,1324 |
| 57 | -12,6 | 21,4 | -3,1 | 2,1476 | 70 | 184,9 | 16,2 | 0,6 | 2,0815 |

Fonte: o autor.