

FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**INFLUÊNCIA DO ROLETEAMENTO A QUENTE AUXILIADO POR  
RADIAÇÃO INFRAVERMELHA NA QUALIDADE SUPERFICIAL DE  
UMA LIGA AERONÁUTICA INCONEL 718**

**EDUARDO LUIZ DE GODOI**

BAURU 2017

FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**INFLUÊNCIA DO ROLETEAMENTO A QUENTE AUXILIADO POR  
RADIAÇÃO INFRAVERMELHA NA QUALIDADE SUPERFICIAL DE  
UMA LIGA AERONÁUTICA INCONEL 718**

**EDUARDO LUIZ DE GODOI**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, UNESP – Campus de Bauru, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**Orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo de Ângelo Sanchez**

BAURU 2017

Godoi, Eduardo Luiz.

Influência do roleteamento a quente auxiliado por radiação infravermelha na qualidade superficial de uma peça de liga aeronáutica Inconel 718: / Eduardo Luiz de Godoi, 2017

92 f. il.

Orientador: Luiz Eduardo de Angelo Sanchez

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017

1. Roleteamento a quente. 2. Tensão residual. 3. Acabamento superficial. 5. Desvio de circularidade I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.




UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru



**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado DE EDUARDO LUIZ DE GODOI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 18 dias do mês de dezembro do ano de 2017, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. AMAURI HASSUI do(a) Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais / Universidade Estadual de Campinas, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de EDUARDO LUIZ DE GODOI, intitulada **INFLUÊNCIA DO ROLETEAMENTO A QUENTE AUXILIADO POR RADIAÇÃO INFRAVERMELHA NA QUALIDADE SUPERFICIAL DE UMA PEÇA DE LIGA AERONÁUTICA INCONEL 718**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO \_\_\_\_\_. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

  
Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ

  
Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI

  
Prof. Dr. AMAURI HASSUI

Dedico esta conquista primeiramente a Deus, a minha esposa,  
meu filho e familiares pelo apoio e incentivo.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, que concedeu a vida, saúde e persistência para a realização deste trabalho. Por me guiar, iluminar e conceder força, tranquilidade, paciência para perseguir e alcançar meus sonhos.

Ao orientador Prof. Dr. Luiz Eduardo de Angelo Sanchez pelo incentivo, grande profissionalismo e ensinamentos e orientação durante toda a realização deste trabalho. Agradeço também ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (FEB/UNESP), em especial aos técnicos de laboratório pelo apoio.

A VILLARES METALS na pessoa da Eng. Cristiane Sales Gonçalves por disponibilizar os recursos materiais Inconel 718 necessários ao desenvolvimento deste trabalho.

A Empresa SANDIVIK COROMANT pelo fornecimento dos insertos para usinagem e em especial aos Srs. Aldeci Santos e Plinio Pires.

A Universidade Federal Fluminense na pessoa da Prof. Dr. Maria Cindra Fonseca pela realização das medições de tensão residual.

Ao Instituto Federal de Ciência e tecnologia de São Paulo Campus São Carlos pelo apoio ao incentivo a qualificação. Por fim, agradeço a todos que de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

A operação de roleteamento é realizada com o intuito de diminuir a rugosidade e melhorar as propriedades mecânicas da peça, como o aumento da dureza e da resistência à fadiga. O processo se dá sem remoção de material, por meio de trabalho a frio, no qual a ferramenta promove o escoamento do material dos picos para o preenchimento dos vales na superfície da peça de trabalho. Esta operação envolve deformação plástica com consequente introdução de tensão residual de compressão nas camadas subsuperficiais da peça. No entanto, as forças de contato envolvidas no processo podem ser excessivamente altas ao ponto de produzir desvios de forma afetando a qualidade superficial da peça acabada. Para minimizar estes problemas, encontram-se pesquisas que utilizam um feixe de laser para o aquecimento localizado da peça na região imediatamente anterior ao contato da ferramenta. Porém, por questões de custo e espaço físico em torno da máquina, este método tem seu uso restrito. A fim de tornar o roleteamento a quente mais viável, neste trabalho é proposto o uso de resistência elétrica em cerâmica, de baixo custo, a qual emite radiação infravermelha como fonte de calor. Para medir a eficiência da técnica proposta foram realizadas operações de roleteamento convencional e comparadas com a condição a quente empregando uma liga aeronáutica inconel 718. Foram analisadas importantes variáveis de saída do processo relacionadas com a qualidade superficial, como a rugosidade, microdureza, tensão residual e circularidade, quando utilizados diferentes parâmetros de entrada, como força de contato, rotação da peça e número de passes. Os resultados demonstraram que a rugosidade (parâmetros Ra e Rt) dos corpos de prova roleteados apresentou uma redução de aproximadamente 20% sem auxílio e 23% com auxílio de radiação infravermelha em relação ao valor observado antes da operação, ao passo que a dureza superficial apresentou elevação de cerca de 20% sem auxílio e 35 % com auxílio de radiação infravermelha em comparação ao componente torneado. A tensão residual registrada na superfície dos corpos de prova passou a ser tensão residual de compressão e atingiu camadas subsuperficiais após roleteamento a quente e os valores de desvio de circularidades diminuíram.

**Palavras Chaves:** *roleteamento, tensão residual, acabamento superficial, desvio de circularidade, roleteamento a quente.*

## ABSTRACT:

The burnishing operation is performed in order to reduce roughness and improve the mechanical properties of the part, such as increased hardness and fatigue resistance. The process takes place without material removal by means of cold working, in which the tool promotes the flow of the material from the peaks to fill the valleys on the surface of the workpiece. This operation involves plastic deformation with consequent introduction of residual compressive stress in the subsurface layers of the part. However, the forces involved in the process may be excessively high to the extent of producing shape deviations affecting the surface quality of the finished workpiece. To minimize these problems, there are researches that use a laser beam for localized heating of the part in the region immediately prior to the tool contact. However, for reasons of cost and physical space around the machine, this method has its restricted use. In order to make hot rolling more feasible, in this work the use of low cost electric ceramic resistance is proposed, which emits infrared radiation as a source of heat. To measure the efficiency of the proposed technique, conventional burnishing operations will be performed and compared to the hot condition using an aeronautical alloy 718 Inconel. Important process output variables related to surface quality, such as roughness, micro hardness, residual stress and circularity, when using different input parameters, such as force, part rotation and number of passes. The results showed that the roughness (Ra and Rt parameters) of the test specimens showed a reduction of approximately 20% without aid and 23% with the aid of infrared radiation in relation to the value observed before the operation, whereas the surface hardness presented increase of about 20% without assistance and 35% with the aid of infrared radiation in comparison to the turned component. The residual stress recorded on the surface of the specimens increased and reached subsurface layers after hot burnishing, the values of deviation of circularities decreased.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de roleteamento por rolo (YELDOSE & RAMAMMORTHY, 2008).....	19
Figura 2 - Escoamento do material dos picos para os vales no processo de roleteamento (RAO et al., 2011).....	19
Figura 3 - Esquema da operação de roleteamento e das modificações estruturais na peça de trabalho (Adaptado de Akkurt, A.)2011.....	20
Figura 4 - Operação de roleteamento e visualização das três zonas presentes na área de contato ferramenta-peça (Adaptado de Murthy e Kotiveerachari, 1981).....	21
Figura 5 Parâmetros que mais têm influência na (a) rugosidade superficial e (b) microdureza (El-Taweel e El-Axir, 2009).....	22
Figura 6 - Efeito da velocidade de roleteamento na rugosidade média para diferentes larguras de contato com $F = 240$ N e $f = 0,11$ mm/rev (El-Tayeb et al., 2007).....	23
Figura 7 - Efeito da rotação da peça na dureza superficial com $F = 240$ N, $f = 0,11$ mm/rev, largura de contato = 1 mm (El-Tayeb et al., 2007).....	23
Figura 8 - Relação entre rugosidade Ra e ângulo de inclinação (Okada et al., 2015).....	24
Figura 9 - Vistas ampliadas das superfícies (a) torneada e (b)-(d) roleteadas com $V_r = 100$ m/min, $F = 240$ N e $f = 0,50$ mm/rev (Okada et al., 2015).....	25
Figura 10 - Perfis tridimensionais das superfícies (a) torneada e (b)-(d) roleteadas com $V_r = 100$ m/min, $F = 240$ N e $f = 0,50$ mm/rev (Okada et al., 2015).....	26
Figura 11 - Topografia em 3D e perfis da rugosidade (a) após operação de torneamento (b) após o roleteamento com pressão de 10 MPa (c) após o roleteamento com pressão de 20 MPa (Rodriguez et al; 2012).....	29
Figura 12 - Microestrutura e valores da microdureza (a) após a operação de torneamento (b) após o processo de roleteamento com pressão de 10 MPa (c) após o processo de roleteamento com pressão de 20 MPa (Rodriguez et al; 2012).....	29
Figura 13 – Rugosidade média versus número de passes utilizando diferentes profundidades de penetração. (EL-KHABEERY & EL-AXIR, 2001).....	31
Figura 14 – Rugosidade média versus velocidade de roleteamento em diferentes profundidades de penetração. (EL-KHABEERY & EL-AXIR, 2001).....	32
Figura 15 – Efeitos principais para Rugosidade Ra ( $\mu$ m). (PATEL et al., 2014).....	33
Figura 16 - Comparação dos valores de dureza superficial de acordo com o método de processamento. (AKKURT, 2011).....	34

Figura 17 – (a) Microdureza versus velocidade; (b) Microdureza versus avanço; (c) Microdureza versus força. (COBANOGLU & OZTURK, 2015). .....	35
Figura 18 – Variação da dureza superficial pela influência do número de passes aplicados. (RAO et al., 2011). .....	36
Figura 19 - Efeito da tensão residual no desempenho dos materiais. (TOTTEN,2002).....	37
Figura 20 – Relação entre a máxima tensão residual e alguns parâmetros de roleteamento (El-Khabeery & El-Axir, 2001). .....	38
Figura 21 - Influência do avanço no perfil de tensão residual: (a) na direção axial e (b) na direção circunferencial. (CHOMIENNE et al., 2016). .....	39
Figura 22 - Influência da velocidade no perfil de tensão residual: (a) na direção axial e (b) na direção circunferencial. (CHOMIENNE et al., 2016). .....	39
Figura 23 - Vida em fadiga de um virabrequim roleteado e não roleteado (MURTHY & KOTIVEERACHARI, 1981).....	40
Figura 24 - (a) Comparação entre a tensão residual obtida através do roleteamento, utilizando força 200 N, e do jateamento de granalhas; (b) Comparação entre a microdureza alcançada pelo processo de roleteamento, aplicando diferentes forças, e pelo processo de jateamento. (ZHANG & LINDEMANN, 2005). .....	41
Figura 25 - Camada de tensão residual de compressão na profundidade abaixo da superfície (Prevéy & Cammett 2001).....	42
Figura 26 - Microestrutura e distribuição do tamanho de grão na superfície do material: (a) antes roleteamento; (b) depois do roleteamento (PU et al., 2012).....	43
Figura 27 - Comparação entre a rugosidade superficial (Ra) e dureza em função dos tipos de tratamentos (HAMADACHE et al., 2006). .....	44
Figura 28 - Comparação da quantidade de perda de peso em função do tempo de contato da peça com um-material abrasivo (HAMADACHE et al., 2006). .....	44
Figura 29 - Efeito da rugosidade superficial inicial para diferentes forças de roleteamento. Parâmetros de roleteamento: V= 26 m/s, f= 0,08 mm/rev, Passes = 1, HVi = 127. (HASSAN & MAQABLEH, 2000). .....	45
Figura 30 - Efeito da dureza superficial inicial para diferentes forças de roleteamento. Parâmetros de roleteamento: V= 23 m/s, f= 0,08 mm/rev, Passes = 1, Rai = 3,32 – 3,41µm (HASSAN & MAQABLEH, 2000).....	46
Figura 31 - Tolerância de circularidade (Fonte: NBR 6409, 1997).....	47
Figura 32 - Esquema do processo de roleteamento auxiliado por laser (Tian & Shin, 2007)..	50
Figura 33 - Relação (razão) de força Ff/Fn no aço 4140 recozido (Tian & Shin, 2007).....	52

Figura 34 - Rugosidade do aço AISI 4140 temperado após o roleteamento (Tian & Shin, 2007). .....	52
Figura 35 – Ferramenta de roleteamento acoplada a um dinamômetro. ....	54
Figura 36 - Esquema da montagem do roleteamento a quente.....	55
Figura 37 - Geometria dos corpos de provas (medidas em mm).....	56
Figura 38 - Torneamento antes do processo de roleteamento. ....	57
Figura 39 – configuração roleteamento convencional.....	58
Figura 40 – Configuração exclusiva para roleteamento a quente.....	61
Figura 41 - Aplicação da pasta lubrificante no corpo de prova.....	61
Figura 42 - Etapas para obtenção da amostra. ....	63
Figura 43 - Região de análise das tensões residuais nas amostras. ....	65
Figura 44 - Influência do número de passes na rugosidade Ra (Força = 850 N; rotação = 560 rpm). ....	67
Figura 45 - Influência da rotação da peça na rugosidade Ra (F = 850 N; número de passes = 4). .....	68
Figura 46 - Descamação superficial no roleteamento aquecido sob 1400 rpm. ....	69
Figura 47 - Influência da força de roleteamento na rugosidade Ra (Número de passes = 4; rotação = 560 rpm). ....	70
Figura 48 - Perfil de rugosidade de os passes de roleteamento convencional e aquecido. ....	73
Figura 49 - Influência do número de passes no desvio de circularidade (Força = 850 N; rotação = 560 rpm). ....	74
Figura 50 - Influência da rotação no desvio de circularidade (F = 850 N; número de passes = 4).....	75
Figura 51 - Influência da força de roleteamento no desvio de circularidade (Número de passes = 4; rotação = 560 rpm). ....	76
Figura 52 - Roleteamento convencional: microdureza obtidas a cada passe. ....	77
Figura 53 - Roleteamento à quente: microdureza obtida em cada passe.....	77
Figura 54 - Tensão residual na superfície do corpo de prova após quatro passes no roleteamento convencional e a quente.....	79
Figura 55 - Microestrutura do corpo de prova sob roleteamento convencional (a) e a quente (b). .....	80
Figura 56 - Microestrutura do corpo de prova torneado.....	80
Figura 57 - Diagrama em <i>LabView</i> para aquisição dos dados de força.....	91
Figura 58 - Diagrama em <i>LabView</i> para aquisição dos dados de temperatura.....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados de circularidade para cada ponto medido na peça de trabalho (Akkurt e Ovali, 2014). .....	26
Tabela 2– Rugosidade da peça 330 HV ( Huuki & Laakso, 2013). .....	48
Tabela 3– Rugosidade da peça 410 HV ( Huuki & Laakso, 2013). .....	48
Tabela 4– Valores de circularidade ( Huuki & Laakso, 2013). .....	49
Tabela 5 - Condições de corte para preparação do corpo de prova.....	56
Tabela 6 - Composição Química inconel 718 (% em peso). .....	56
Tabela 7 - Condições de roleteamento para os ensaios preliminares. ....	58
Tabela 8 - Rugosidade (Ra) obtida nos ensaios preliminares.....	59
Tabela 9 - Parâmetros utilizados no sistema de análise das tensões residuais. ....	65
Tabela 10 - Configuração dos ensaios finais de roleteamento convencional e a quente.....	66

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	17
2.1 Superligas .....	17
2.2 Benefícios do Processo de Roletamento .....	17
2.3 Rugosidade no processo de roletamento .....	30
2.4 Dureza no processo de roletamento .....	33
2.5 Tensão Residual no processo de Roletamento .....	36
2.6 Desvio de circularidade.....	46
2.7 Influência do aquecimento na operação de roletamento .....	49
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	54
3.1 Confecção dos corpos de prova .....	55
3.2 Análise Estatística dos Ensaio Preliminares.....	57
3.3 Medição da rugosidade .....	62
3.4 Preparação das amostras .....	62
3.5 Medição de Microdureza .....	63
3.6 Análise metalográfica .....	64
3.7 Medição de circularidade .....	64
3.8 Análise da Tensão Residual .....	64
3.9 Procedimento experimental.....	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
4.1 Rugosidade.....	67
4.2 Perfil de rugosidade .....	70
4.3 Circularidade .....	73
4.4 Microdureza .....	76
4.5 Tensão Residual .....	79

4.6 Microestrutura.....	80
CONCLUSÕES .....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	84
ANEXO I.....	91
ANEXO II.....	92

## 1 INTRODUÇÃO

A qualidade de um componente usinado depende em grande parte das características da superfície e subsuperfície da peça, como a natureza e a intensidade das tensões induzidas, dureza e rugosidade. Essas características se positiva, melhoram o desempenho em relação a algumas propriedades, como resistência à fadiga, capacidade de carga, atrito e resistência ao desgaste.

Na usinagem atenção considerável é dada aos processos de acabamento, tais como retificação, lapidação e brunimento, os quais são geralmente empregados para melhorar o acabamento superficial, diminuir desvios de forma ou produzir um padrão superficial específico. No entanto, esses processos não promovem um aumento na resistência à fadiga, capacidade de carga, resistência ao desgaste e à corrosão da peça de trabalho. Para atingir tais características mecânicas utiliza-se de métodos como jateamento de granalhas ou tratamentos térmicos após a usinagem para melhorar essas propriedades, no entanto tais processos normalmente são caros e/ou demorados.

O roleteamento é uma operação de acabamento especialmente concebido para fornecer à peça usinada os benefícios advindos da deformação plástica. Nesse processo, de conformação à frio, sem remoção de cavaco é utilizada uma ferramenta composta de uma esfera ou rolo de material polido e mais duro que a peça. Essa ferramenta é pressionada contra a peça, em rotação gerando uma pressão suficientemente elevada para exceder o limite elástico do material da peça causando deformação plástica, onde os picos macroscópicos da superfície, anteriormente usinada, são escoados para os vales da mesma. Como consequência, há encruamento do material e elevação das propriedades mecânicas da peça, tornando o roleteamento um processo tanto de acabamento quanto de aumento de resistência.

O roleteamento vem ganhando importância, pelo fato de ser simples e de fácil aplicação. Além disso, torna-se uma alternativa com significativa vantagem econômica devido à possibilidade de eliminação de operações secundárias de usinagem para acabamento e de tratamentos térmicos, para aumentar o desempenho.

A superfície de materiais usinados é formada por picos e vales, que sob cargas compressivas excede o limite de escoamento do material preenchendo os vales, diminuindo os desvios de circularidade. Os principais fatores a serem controlados durante o roleteamento são: pressão aplicada sobre a peça, número de passes de roleteamento, rotação da peça e avanço da ferramenta.

O roleteamento traz vantagens operacionais e de custo frente aos processos de usinagem para acabamento pois não necessita de um maquinário dedicado.

A ferramenta de roleteamento é fixada em máquinas ferramenta comuns, como torno e fresadora.

El-Axir (2007) investigou as relações entre os parâmetros de roleteamento e vida em fadiga e tensão residual da peça feita de uma liga de alumínio 6061-T6, encontrando importantes resultados referentes à influência dos parâmetros de entrada, sendo a força de contato e o avanço os parâmetros mais importantes no controle dos valores de tensão residual compressiva.

Hassan & Momani (2000) aplicaram roleteamento em peças de trabalho que já haviam sofrido o jateamento de granalha, com o objetivo de diminuir os altos valores de rugosidade gerados pelo processo de jateamento. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que a operação de roleteamento não só melhorou o acabamento da superfície, mas também introduziu aumento na dureza superficial, resistência à fadiga e resistência à corrosão nas peças de trabalho utilizadas, alumínio comercial puro (99,85% Al) e bronze.

No caso de torneamento de materiais de alta dureza, para diminuir os esforços de corte e, conseqüentemente, o desgaste da ferramenta, pode ser utilizado o aquecimento da peça, cujo artifício objetiva a diminuição da tensão limite de escoamento do material e, conseqüentemente, a pressão específica de corte do material, facilitando a sua usinagem.

Na tentativa de minimizar os desgastes da ferramenta e os danos superficiais na peça de trabalho durante o roleteamento, Tian & Shin (2007) utilizando de um laser de potência máxima de 500 W como dispositivo de aquecimento localizado na peça, realizaram 11 experimentos de roleteamento auxiliado por laser, comparando-o com o roleteamento convencional, no aço 4140 temperado (dureza inicial de 42 HRc), 4140 recozido (dureza inicial de 94 HR<sub>B</sub>) e numa liga multifásica denominada MP35N (dureza inicial de 45 HRc). Como resultado, pode-se resumidamente mencionar que, além de diminuir os esforços presentes durante o roleteamento, o processo de aquecimento a laser proporcionou melhor acabamento superficial quando comparado com o roleteamento convencional.

Percebe-se então, o quão vasto vem sendo o campo de pesquisas e investigações a respeito da operação de roleteamento. No entanto, o processo encontra dificuldades em materiais metálicos de média e alta dureza, uma vez que necessita-se de altos esforços radiais e axiais, cujo excesso pode levar a uma aceleração no desgaste da ferramenta, danos à superfície de trabalho (descamação) e deflexão da peça, gerando resultados superficiais indesejáveis além de desvio de forma, comprometendo, em especial, a circularidade.



Contudo, apesar dos melhores resultados obtidos a partir da utilização do laser no processo de roleteamento em relação ao método convencional, o laser é um equipamento de alto custo e que ocupa um grande espaço físico no entorno da máquina ferramenta, assim como os métodos de aquecimento por plasma, por corrente elétrica e por chama. No caso do torneamento, Sanchez et al. (2014) minimizaram estes problemas com a utilização de resistências elétricas em quartzo, de baixo custo, as quais emitem exclusivamente radiação infravermelha, tendo a importante propriedade de aquecer os corpos de prova.

Diante do desejável aquecimento da peça na melhora do processo de roleteamento devido ao abaixamento da tensão limite de escoamento do material, busca-se um método simples e barato de aquecimento que eficientemente possa cumprir os requisitos pretendidos. Neste contexto, o emprego de resistência elétrica de quartzo aparece como boa alternativa.

Portanto, este trabalho tem como objetivo principal o uso de resistências elétricas de quartzo no aquecimento de peças roleteadas e sua influência nas principais variáveis de saída do processo, como: rugosidade, dureza, mudança microestrutural e tensão residual.

Além disso, busca-se avaliar o efeito do roleteamento no desvio de circularidade, uma vez que os resultados, quando avaliados, são controversos na literatura.

O material empregado é o inonel 718 por se tratar de uma liga aeronáutica de difícil trabalho e cujo aumento das propriedades mecânica é altamente desejável, uma vez que sua aplicação é de alta responsabilidade e ganhos de resistência mecânica podem permitir a diminuição das dimensões do componente fabricado.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A revisão bibliográfica apresentada a seguir fundamenta os principais assuntos abordados nesse trabalho relativos ao tema desenvolvido com material inconel 718, bem como rugosidade, circularidade, tensão residual no processo de roleteamento convencional e a quente.

### **2.1 Superligas**

As superligas foram projetadas para prover elevada resistência mecânica, elevada resistência à corrosão e oxidação em altas temperaturas.

O Inconel 718 é uma liga a base de níquel de alta resistência e desempenho, possui resistência à fadiga, boa resistência à corrosão, bem como ductilidade e rigidez e fluência que é a capacidade de operar continuamente em elevadas temperaturas sem deformação do material. (A. Sequera, et al.; 2014).

Segundo Specials metals A liga Inconel ® 718 é uma liga de cromo níquel resistente à corrosão e de alta resistência usado entre -250 ° a 700 ° C.

O Inconel liga 718 tem uma vasta gama de aplicações, exemplos são peças para foguetes, para aeronaves e motores de turbinas a gás e tanques criogênicos, também é usado para fixadores e peças de instrumentação.

### **2.2 Benefícios do Processo de Roleteamento**

Componentes metálicos para aplicações industriais necessitam de alta qualidade em termos de rugosidade e níveis de resistência mecânica para trabalhar sob as condições operacionais demandadas. Componentes mecânicos para máquinas ferramentas, automóveis, aeronaves, moldes de injeção de plástico, matrizes de conformação e vários outros elementos industriais são compostos de peças que necessitam de tolerância geométrica, alta dureza, baixa rugosidade, alta resistência mecânica e integridade superficial e, muitas vezes, devem ser capazes de trabalhar sob condições de alta tensões, como em ciclos de fadiga (TRAVIESO-RODRIGUEZ et al., 2015).

No processo de usinagem, ocorre a formação de picos e vales com alturas e espaçamentos irregulares deixados pela ferramenta de usinagem. Geralmente, procura-se

diminuir a rugosidade de acordo com a aplicação da peça fabricada (GHARBI et al, 2011). Para isso são comumente utilizados processos de acabamento, tais como a retificação, a lapidação, o brunimento e o polimento que, além de produzir baixos valores de rugosidade diminuem os desvios de forma ou até mesmo produzem um padrão superficial específico desejado. Entretanto, o desempenho dos componentes não depende exclusivamente dessas características superficiais, mas, também, de suas propriedades mecânicas (LOH, et al, 1989).

As propriedades mecânicas não são capazes de serem melhoradas somente com os processos de acabamento citados e, para isso, recorre-se após a usinagem, por exemplo, à tratamentos térmicos, termoquímicos ou ao uso do jateamento de granalhas das peças, que são capazes de aumentar a vida em fadiga, a capacidade de carga, resistência ao desgaste e a corrosão ao alterar a microestrutura do material, aumentar sua dureza, introduzir encruamento ou tensões residuais de compressão sobre a camada superficial e subsuperficial da peça (COBANOGLU & OZTURK, 2014).

Roleteamento é amplamente utilizado em vários componentes da engenharia, como assentos cônicos para cilindros hidráulicos, cilindros de elevadores hidráulicos, pistões hidráulicos, assentos esféricos, diâmetros externos de rolamentos e superfície de virabrequins (MURTHY e KOTIVEERACHARI, 1981).

O processo de roleteamento foi desenvolvido a partir de requisitos de simplicidade e facilidade de aplicação, podendo eliminar operações secundárias de usinagem e tratamentos térmicos, sendo realizado na própria máquina ferramenta onde a peça foi usinada. Basicamente, o dispositivo de roleteamento é montado no lugar do porta-ferramenta reduzindo substancialmente o tempo de fabricação e de custos e, ao mesmo tempo, podendo ser uma alternativa ao processo de retificação e ao jateamento de granalha, sendo cada vez mais utilizado na fabricação de componentes para indústria aeroespacial, médica, automotiva e nuclear (ABRÃO, 2014; SCHULZE, 2006; ZHANG et al., 2014).

Esse processo de conformação a frio, sem formação de cavaco, consiste da utilização de uma ferramenta de rolo ou de esfera. Essa esfera ou rolo de material mais duro que a peça é pressionado contra a peça, com uma força de contato transmitida através de uma mola ou de um sistema de transmissão hidráulica, gerando uma tensão superficial suficientemente elevada para exceder o limite elástico causando deformação plástica, onde os picos microscópicos da superfície anteriormente usinada são escoados para os vales da mesma, diminuindo substancialmente suas asperezas (EL-AXIR, 2000; MALLESWARA et al., 2011; RAO et al., 2011), conforme ilustrado na Figura 1 e 2.

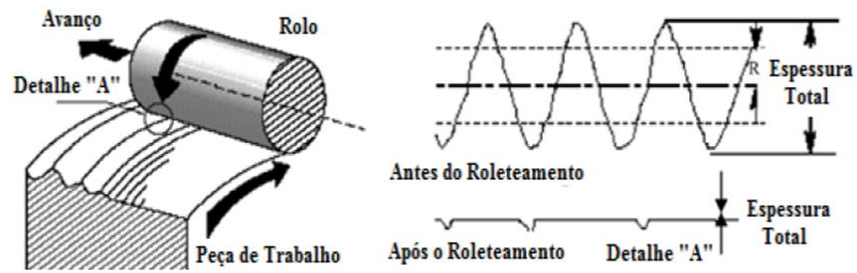


Figura 1 - Processo de roleteamento por rolo (YELDOSE & RAMAMMORTHY, 2008).

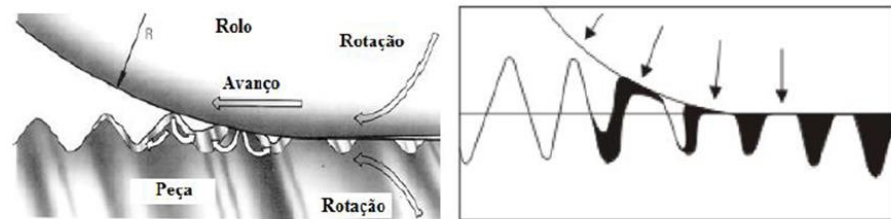


Figura 2 - Escoamento do material dos picos para os vales no processo de roleteamento (RAO et al., 2011).

Como resultado, obtém-se uma menor rugosidade comparado com a usinagem, aumento da resistência a corrosão e ao desgaste, acréscimo da dureza da camada superficial devido ao encruamento e, principalmente, a indução de tensões residuais compressivas, ao contrário da retificação, de submeter a superfície da peça trabalhada ao efeito de queima e decarbonetização e com um acabamento superficial muito mais regular do que o obtido com o jateamento de granalhas (MURTHY & KOTIVEERACHARI, 1981; SAÏ & LEBRUN, 2003; HASSAN & MOMANI, 2000; NEAGU-VENTZEL, 2011; LUO *et al.*, 2005).

Processos de usinagem como torneamento, furação, aplainamento, mandrilamento e fresamento na maioria das vezes não produzem superfícies com bom acabamento superficial, dessa forma essas operações são geralmente seguidas de retificação. (RAJESHAM e TAK, 1989).

Os principais fatores a serem controlados durante o roleteamento são: pressão de contato (ou força de contato) aplicada, número de passes de roleteamento, material e diâmetro da ferramenta, velocidade da peça e avanço de roleteamento. Estudos conduzidos por El-Axir (2000), Akkurt (2011), Ghodake et al. (2013), Loh, Tam & Miyazawa (1993), Hassan et al. (1996), Cobanoglu & Ozturk (2014) e Saï & Lebrun (2003) demonstram que a diminuição da rugosidade, a intensidade do aumento da dureza e da tensão residual de compressão, o

crescimento da resistência ao desgaste e à fadiga obtidos no processo de roleteamento dependem fortemente desses parâmetros.

A maioria das trincas iniciam-se e propagam-se a partir da superfície dos componentes, ainda que tenha pequeno volume em relação ao núcleo, é nesta região que se determinam as principais propriedades funcionais de uma peça. As propriedades físicas da camada externa da peça podem causar falhas críticas em aproximadamente 85% dos componentes de máquinas modernas (YELDOSE e RAMAMMORTHY, 2008).

As características superficiais obtidas no processo de roleteamento são altamente desejáveis, por exemplo, em eixos rotativos utilizados nas indústrias automotivas, ferroviárias e de energia, os quais são projetados para durar muitos anos sem apresentar falhas, como eixos de comando de válvulas e eixos ferroviários que devem resistir no mínimo 30 anos ou mais de serviço, visto que a vida em fadiga é geralmente aumentada com um bom acabamento superficial final, altos valores de tensão residual compressiva e maior microdureza da peça (RODRÍGUEZ *et al.*, 2012).

A Figura 3 ilustra a indução de tensão, acréscimo de dureza e redução da rugosidade numa peça obtida pelo processo de roleteamento.

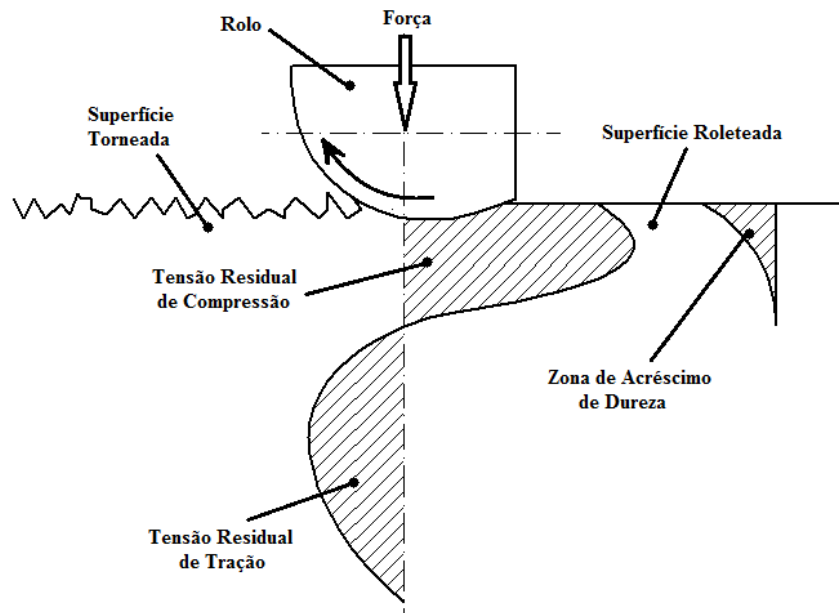


Figura 3 - Esquema da operação de roleteamento e das modificações estruturais na peça de trabalho (Adaptado de Akkurt, A.)2011.

Segundo Murthy e Kotiveerachari (1981) a área de contato entre a ferramenta de roletear e a peça de trabalho tem o formato de uma gota e é composta por três zonas. Desconsiderando a perda intermitente de contato devido ao movimento rotativo (esta perda não

afeta o resultado), a superfície do metal trabalhado é inicialmente comprimida, em seguida sofre alteração plástica e, finalmente, sofre um acabamento final com uma diminuição progressiva da pressão de contato. A principal ação acontece na zona de plastificação central, onde o metal dos picos e dos vales tornam-se plásticos, promovendo escoamento do metal e o preenchimento dos vales com material dos picos. Na Figura 4 pode-se observar as três zonas presentes na área de contato ferramenta-peça.

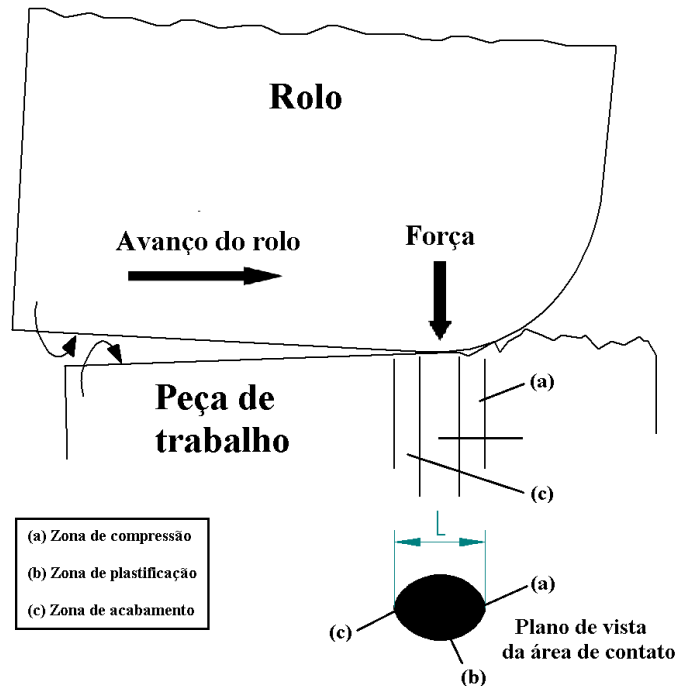


Figura 4 - Operação de roleteamento e visualização das três zonas presentes na área de contato ferramenta-peça (Adaptado de Murthy e Kotiveerachari, 1981).

El-Taweel e El-Axir (2009) aplicaram Método de Taguchi para otimizar o processo de roleteamento, estudando e identificando a influência dos principais parâmetros de entrada (velocidade de roleteamento, taxa de avanço, força de contato e número de passes) na rugosidade e dureza superficial atingidas. Para isso, métodos de análise de variância (ANOVA), relação sinal-ruído (S/N) e modelo aditivo foram utilizados, obtendo os parâmetros significativos e avaliando os níveis de combinações para o processo de roleteamento. As análises dos resultados mostraram que a força de roleteamento teve o maior efeito na alteração da rugosidade (diminuição de 39,97%) e dureza superficial (aumento de 42,85%), seguida de taxa de avanço de roleteamento, velocidade e número de passes. O menor valor de rugosidade superficial foi obtido para uma velocidade de roleteamento de 49 m/min, taxa de avanço de 0,15 mm/rev, força de contato da ferramenta de 150 N e número de passes igual a três, conforme

apresentado na Figura 5(a). A Figura 5(b) ilustra que a melhora máxima da microdureza foi obtida na menor velocidade de roleteamento, média taxa de avanço, maior força e maior número de passes.

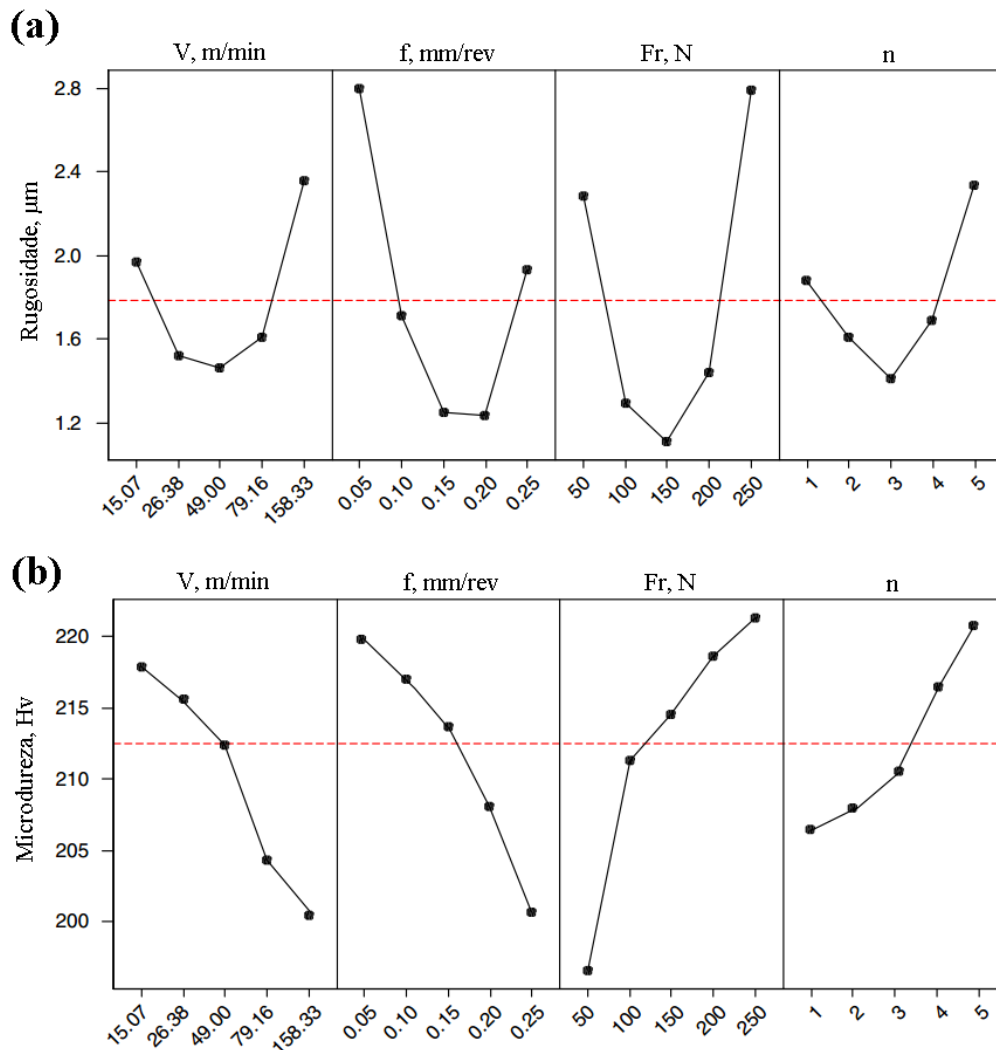


Figura 5 Parâmetros que mais têm influência na (a) rugosidade superficial e (b) microdureza (El-Taweel e El-Axir, 2009).

El-Tayeb *et al.* (2007) utilizaram uma ferramenta de roletear de rolo, com adaptador intercambiável, e realizaram roleteamento em uma peça de trabalho de alumínio 6061 sob diferentes parâmetros de entrada e orientações de roleteamento. A influência da velocidade da peça, força de contato, e largura de contato ferramenta-peça de trabalho sobre a qualidade superficial e o comportamento tribológico foram investigados. Verificou-se que com uma velocidade de roleteamento de 330 rpm e uma força de contato da ferramenta de 240 N foi possível atingir uma melhora de 40% na rugosidade (Figura 6).

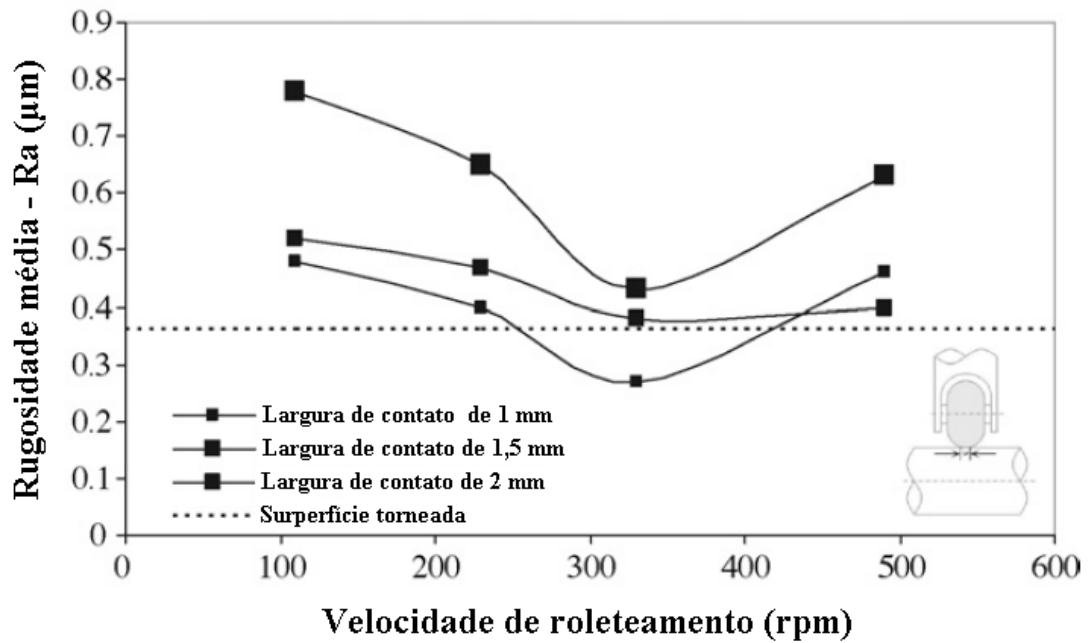


Figura 6 - Efeito da velocidade de roleteamento na rugosidade média para diferentes larguras de contato com  $F = 240$  N e  $f = 0,11$  mm/rev (El-Tayeb et al., 2007).

A Figura 7 indica que a rotação da peça de 110 rpm produz o maior aumento (30%) na dureza superficial. Observa-se que o aumento da velocidade leva à redução da dureza, em trabalhos anteriores El-Khabeery e El-Axir (2001) explicaram que isso ocorre devido à diminuição da ação de deformação do rolo provocada pelo aumento de velocidade de roleteamento.

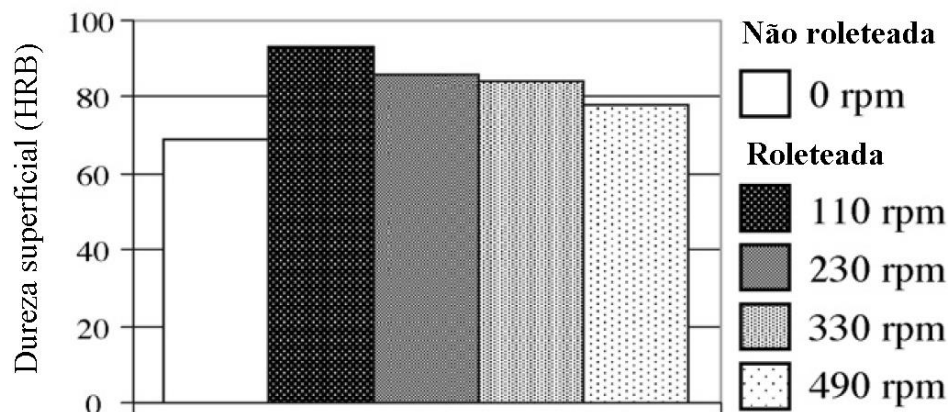


Figura 7 - Efeito da rotação da peça na dureza superficial com  $F = 240$  N,  $f = 0,11$  mm/rev, largura de contato = 1 mm (El-Tayeb et al., 2007).



Okada *et al.* (2015) construíram uma ferramenta de roleteamento que permite o giro do rolo em relação ao eixo axial da peça de trabalho, podendo estudar o efeito do deslizamento e da inclinação da ferramenta durante a operação. Foi usado uma liga de alumínio ASTM 2017, inicialmente com rugosidade  $R_a = 3,2 \mu\text{m}$ , como peça de trabalho para avaliar e comparar a influência da inclinação durante o roleteamento. A Figura 8 mostra a relação entre a rugosidade  $R_a$  e o ângulo de inclinação da ferramenta de rolo ( $\alpha$ ). Nota-se que o valor de rugosidade  $R_a$  diminui com aumento de  $\alpha$ , obtendo-se o menor valor de  $0,4 \mu\text{m}$  para o ângulo de  $45^\circ$ , comprovando a eficiência do roleteamento inclinado. No entanto, para  $\alpha = 60^\circ$  a superfície deteriora-se de maneira intensa, aumentando o valor do  $R_a$  para  $0,8 \mu\text{m}$ . Isso ocorre, pois, o rolo não gira em torno de seu eixo, ele apenas desliza sobre a peça afetando a qualidade superficial desta.

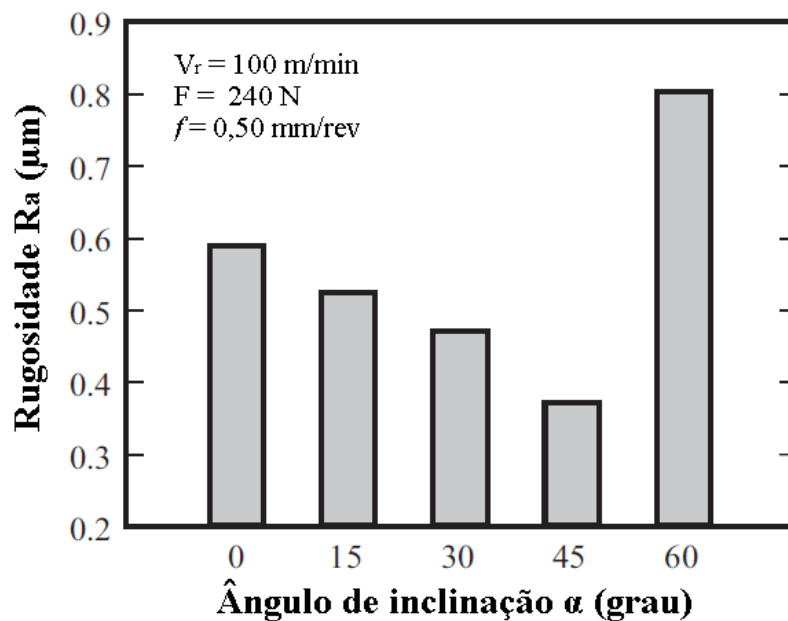


Figura 8 - Relação entre rugosidade  $R_a$  e ângulo de inclinação (Okada et al., 2015).

A Figura 9 destaca as vistas ampliadas das superfícies roleteadas. Na superfície com  $\alpha = 0^\circ$ , observa-se um padrão listrado na direção circunferencial, o qual manteve-se da superfície inicial torneada. Em  $\alpha = 45^\circ$ , além do padrão listrado, marcas de deslizamento na direção oblíqua também são observadas. A aparência da superfície em  $\alpha = 60^\circ$ , a qual não inclui efeito de rolamento, é semelhante à do método convencional.

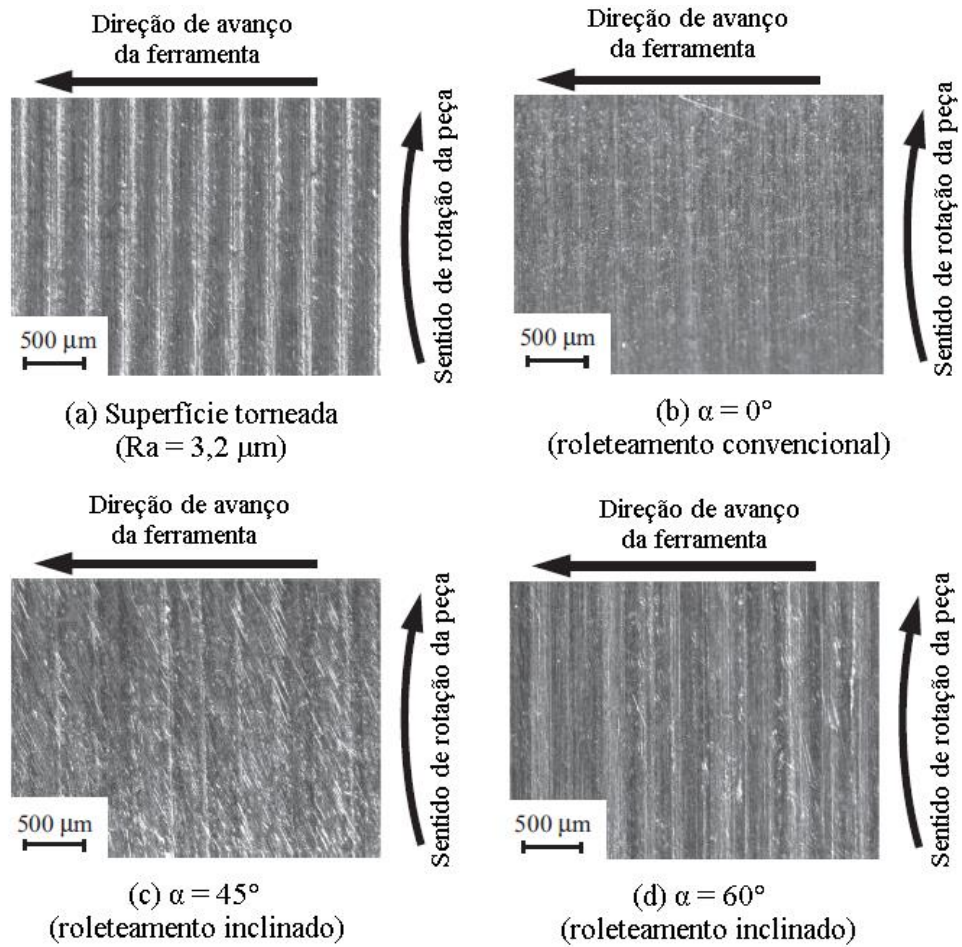


Figura 9 - Vistas ampliadas das superfícies (a) torneada e (b)-(d) roleteadas com  $V_r = 100$  m/min,  $F = 240$  N e  $f = 0,50$  mm/rev (Okada et al., 2015).

Através dos perfis em 3D das superfícies torneada e roleteadas (Figura 10), nota-se que tanto roleteamento convencional ( $\alpha = 0^\circ$ ) quanto roleteamento inclinado podem diminuir as irregularidades e conseqüentemente a rugosidade. O roleteamento inclinado com ângulo de  $45^\circ$  obteve os menores valores de rugosidade, isso deve-se à menor área de contato ferramenta-peça nesta configuração, ou seja, para mesma força em diferentes inclinações, a inclinação de  $45^\circ$  promove maior pressão e, conseqüentemente, maior deposição dos materiais dos picos para os vales da superfície da peça de trabalho.

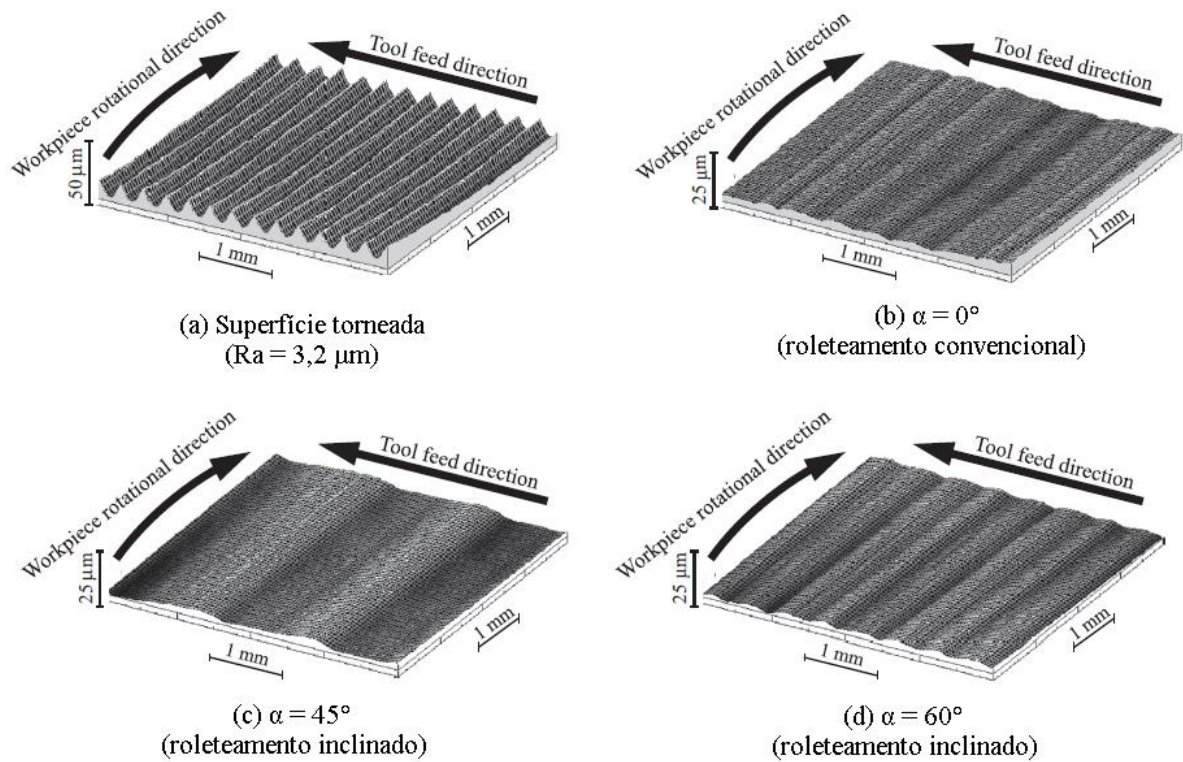


Figura 10 - Perfis tridimensionais das superfícies (a) torneada e (b)-(d) roleteadas com  $V_r = 100 \text{ m/min}$ ,  $F = 240 \text{ N}$  e  $f = 0,50 \text{ mm/rev}$  (Okada et al., 2015).

Akkurt e Ovali (2014) investigaram os efeitos do roleteamento interno e de outros processos convencionais de acabamento (retificação, mandrilamento, furação, torneamento e brunimento) na circularidade de um aço médio carbono. A Tabela 1 apresenta os resultados de circularidade para diferentes pontos medidos.

Tabela 1 - Resultados de circularidade para cada ponto medido na peça de trabalho (Akkurt e Ovali, 2014).

Circularidade ( $\mu\text{m}$ )						
	Furação	Torneamento	Mandrilamento	Retificação	Brunimento	Roleteamento
1	54,96	13,98	17,09	9,11	5,76	4,58
2	40,23	13,98	16,32	7,81	2,95	4,17
3	40,98	7,87	13,30	7,92	2,62	2,72
4	36,52	6,64	4,86	9,58	3,59	1,86
5	49,30	8,98	8,24	14,29	1,45	1,92

O processo de roleteamento apresentou bons resultados comparado com as outras operações de acabamento, Akkurt e Ovali (2014) afirmam que isso deve-se ao preenchimento das cavidades com o material decorrente da deformação plástica, uniformizando a circunferência e obtendo melhores resultados de circularidade.

Tian e Shin (2007) realizaram roleteamento auxiliado por laser de alta potência na tentativa de minimizar os desgastes da ferramenta e os danos superficiais na peça de trabalho. Além de diminuir os esforços presentes durante roleteamento, o processo de aquecimento a laser proporcionou melhoras no acabamento superficial e gerou tensões residuais de compressão maiores quando comparado com o roleteamento convencional.

Utilizando corpos de prova em aço St-37 (aproximadamente equivalente ao ABNT 1020), com dureza de 220 HV, El-Axir (2000) realizou ensaios combinando os diversos parâmetros de roleteamento sendo empregadas as rotações de 46, 150, 230, 370 e 480 rpm, forças radiais de 50, 150, 350 e 450 N, avanços de 0,06, 0,14, 0,28 e 0,34 mm/rev e o número de passes de um até cinco. Como resultado, a melhor combinação entre microdureza e acabamento superficial foi obtida quando se empregou rotações da peça entre 150 e 230 rpm. A mais alta dureza superficial foi atingida com força de contato de aproximadamente 350 N, enquanto que para a mais baixa rugosidade, a força de contato foi de cerca de 250 N. O melhor resultado para ambos, rugosidade e dureza, foi obtido com o menor avanço, de 0,006 mm/rev. O melhor resultado de microdureza foi obtido com grande número de passes, acima de 8, enquanto que para o acabamento superficial foi de apenas 3 a 4 passes.

El-Tayeb et al. (2006), utilizando de uma peça de Alumínio 6061, investigaram influência da velocidade do roleteamento, força de roleteamento e espessura de contato ferramenta-peça na qualidade superficial alcançada, e também no comportamento tribológico entre a ferramenta de rolo e a peça. Verificou-se que empregando rotação de roleteamento de 330 rpm, força de contato de 212 N e espessura de contato ferramenta-peça no valor de 1 mm permitiu-se uma melhora na rugosidade de 40%. Além disso, através da análise morfológica da superfície, constatou-se que para maiores larguras de contato nos valores de 1,5 e 2 mm a superfície se deteriora devido a deformação plástica excessiva.

Morimoto (1988) analisou a influência do número de passes de roleteamento na diminuição da rugosidade e no aumento da dureza superficial empregando esfera sobre um aço de médio carbono (JIS S38C – 0,35% a 0,41% de C) com rugosidade Ra inicial de 4,0  $\mu\text{m}$ . Utilizando-se de uma força de contato de 60 N, avanço de 0,05 mm/rev e uma velocidade de roleteamento de 98 m/min obteve-se uma rugosidade Ra de 0,46  $\mu\text{m}$  após o primeiro passe, 0,10  $\mu\text{m}$  após o segundo e, finalmente, 0,09  $\mu\text{m}$  após o terceiro passe. Observou-se ainda que a

taxa de acréscimo de microdureza é maior no primeiro passe e diminui gradualmente nos passes seguintes, devido ao encruamento do material, que dificulta a deformação plástica promovida pelo roleteamento.

Rodríguez et al. (2012) realizaram uma análise dos principais benefícios alcançados através da aplicação do roleteamento de esfera em um aço AISI 1045, por meio de parâmetros definidos através de vários ensaios. Após o torneamento, roleteamento sob pressões de 10 e 20 MPa e velocidade de 150 m/min a rugosidade Ra foi de 3,56  $\mu\text{m}$  (peça torneada) a 15 0,24  $\mu\text{m}$  (10 MPa) e 0,31  $\mu\text{m}$  (20 MPa) (Figuras 11 (a,b,c)), mostrando que a maior pressão causou um efeito prejudicial ao invés de benéfico no acabamento da peça. Isso deve-se ao efeito de descamação ocasionado pela ultrapassagem da força limite aplicada, necessária para obtenção de um bom acabamento. No entanto, a camada mais externa da peça ganhou um pequeno aumento de dureza, refletindo também num pequeno ganho na tensão residual de compressão nesta região, conforme pode-se observar na Figura 12. A Figura 12(a) mostra que após o torneamento, a dureza da subsuperfície é aproximadamente constante e com baixos valores próximos a superfície. As Figuras 12(b) e 12(c) exibem uma deformação nos grãos sub e superficiais devido ao processo de trabalho a frio durante o roleteamento. Esta deformação é considerável próximo a superfície (20 - 30  $\mu\text{m}$ ).

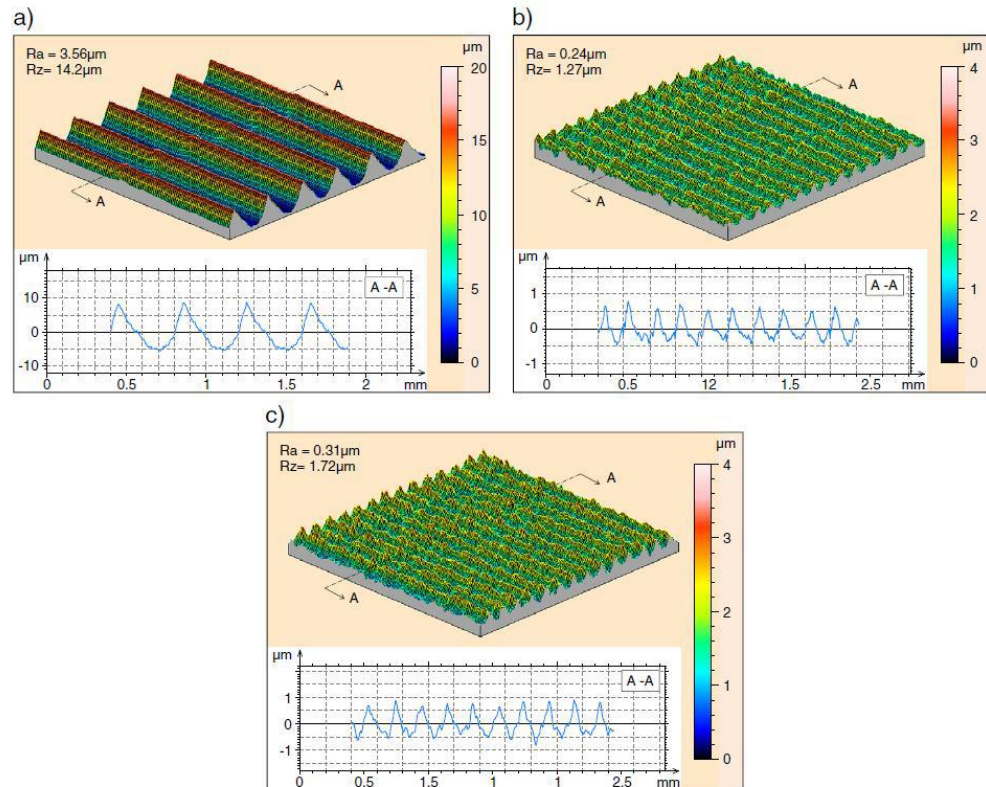


Figura 11 - Topografia em 3D e perfis da rugosidade (a) após operação de torneamento (b) após o roleteamento com pressão de 10 MPa (c) após o roleteamento com pressão de 20 MPa (Rodriguez et al; 2012)

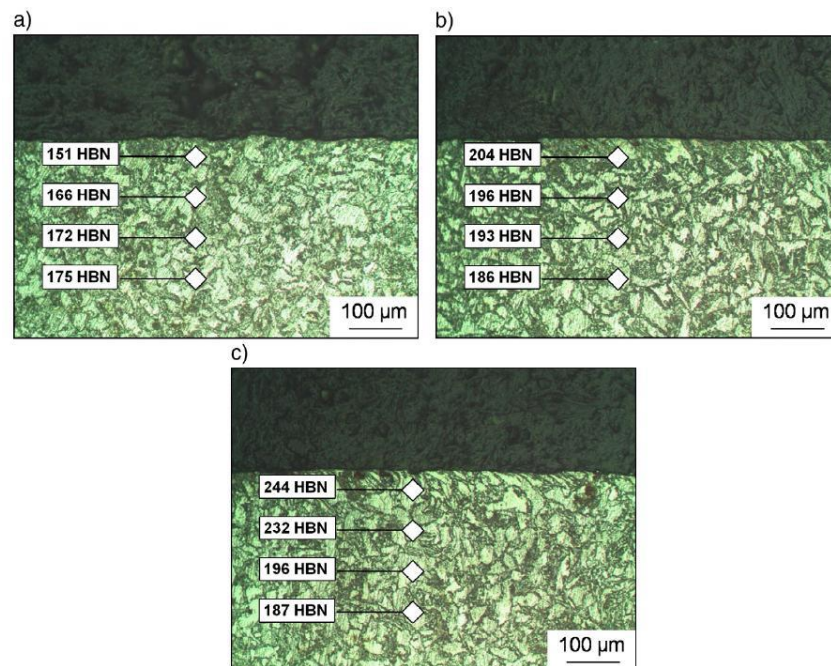


Figura 12 - Microestrutura e valores da microdureza (a) após a operação de torneamento (b) após o processo de roleteamento com pressão de 10 MPa (c) após o processo de roleteamento com pressão de 20 MPa (Rodriguez et al; 2012).

### 2.3 Rugosidade no processo de roleteamento

Conjunto de desvios microgeométricos, caracterizado pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície. Norma NBR ISO 4287

A rugosidade é o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências ou reentrâncias que caracterizam uma superfície. Ela é causada devido as diferenças cinemáticas inerentes ao processo de corte ou usinagem (RAO et al., 2010).

O roleteamento baseia-se em causar pequenas deformações plásticas na superfície da peça, que provocam o deslocamento do material a partir dos “picos” ou “cumes” para os “vales” ou “depressões” das microirregularidades superficiais. Este mecanismo é realizado por um elemento rolante que se move ao longo da superfície, ao mesmo tempo que uma força de contato é aplicada. Uma vez que os parâmetros ideais foram estabelecidos, através do processo de roleteamento, a redução da rugosidade obtida é geralmente mais do que uma ordem de magnitude, melhorando em cerca de 90%. (RODRÍGUEZ et al., 2012)

O número de passes de roleteamento é um dos fatores mais importantes que afetam a rugosidade da superfície. Isso porque a repetição do processo de roleteamento sobre a mesma peça de trabalho leva a um aumento da homogeneidade estrutural. Entretanto, em alguns casos, geralmente utilizando-se de forças elevadas, aumentar o número de passes mais do que um determinado valor também leva a uma deterioração da superfície. Figura 13, onde foram realizados ensaios sobre corpos de prova de liga de alumínio 6061-T6, utilizando de um a cinco passes e a força de roleteamento mensurada através da penetração dada pelo rolete sobre a superfície da peça. (EL-KHABEERY & EL-AXIR, 2001).

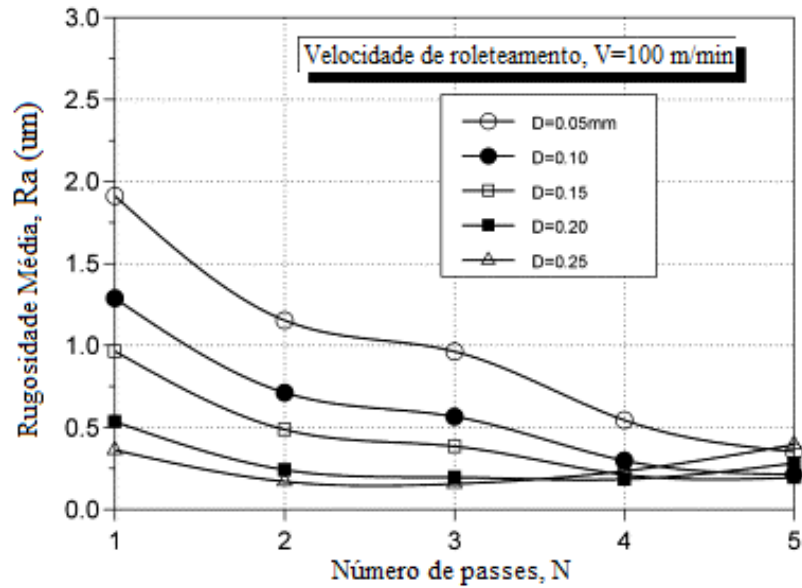


Figura 13 – Rugosidade média versus número de passes utilizando diferentes profundidades de penetração. (EL-KHABEERY & EL-AXIR, 2001).

A Figuras 14 mostra o efeito da velocidade do roleteamento sobre a rugosidade da superfície da peça, utilizando diferentes profundidades da penetração. Em geral, o aumento na velocidade de roleteamento até certo limite (no caso, até cerca de 100 m/min) conduz a uma diminuição da rugosidade média. Com um aumento adicional da velocidade, a rugosidade média aumenta gradualmente pela vibração gerada a altas velocidades e pela perda do efeito do lubrificante que, não tem tempo suficiente para penetrar eficientemente entre o rolo e a superfície da peça, resultando em instabilidade no processo de roleteamento (EL-KHABEERY & EL-AXIR, 2001).



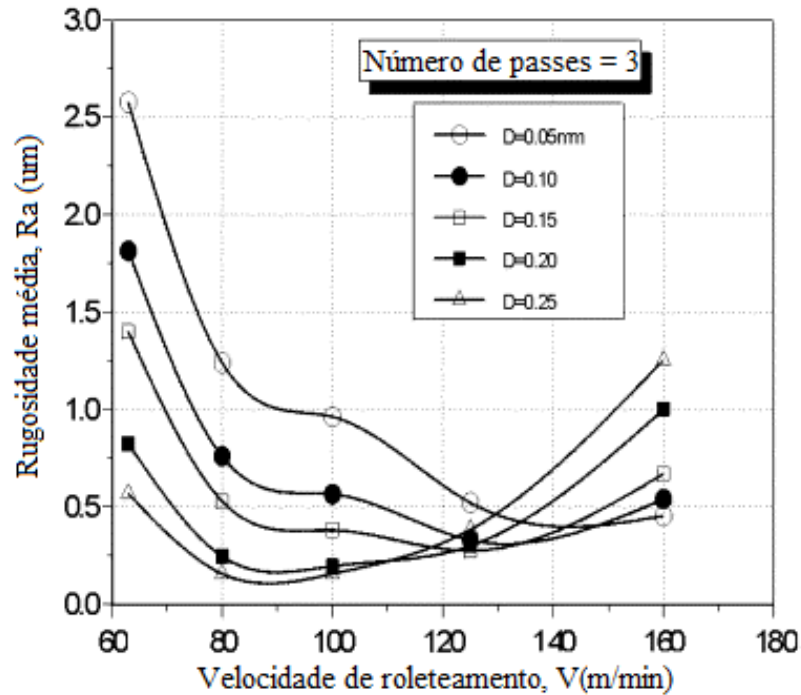


Figura 14 – Rugosidade média versus velocidade de roleteamento em diferentes profundidades de penetração. (EL-KHABEERY & EL-AXIR, 2001).

Em resumo, Patel *et al.* (2014) para analisar os parâmetros de velocidade de roleteamento ou rotação da peça, força de contato aplicada, avanço e número de passes sobre a rugosidade superficial obtida no processo em corpos de prova de liga de alumínio 6061 T6, utilizou a Análise de Variância (ANOVA) e, com a figura de efeitos principais (*main effects plot*), como pode ser visualizado na Figura 15, pôde concluir que: (a) a efetividade do roleteamento decresce com o acréscimo da taxa de avanço; (b) a rugosidade é melhorada com o acréscimo do número de passes; (c) a combinação do maior número de passes com a menor força de contato resulta num bom acabamento superficial entretanto com o acréscimo da força até 25 kgf e com maior número de passes obtém-se o melhor resultado; (d) o aumento da rotação da peça a partir de um certo valor acaba sendo prejudicial para a rugosidade.

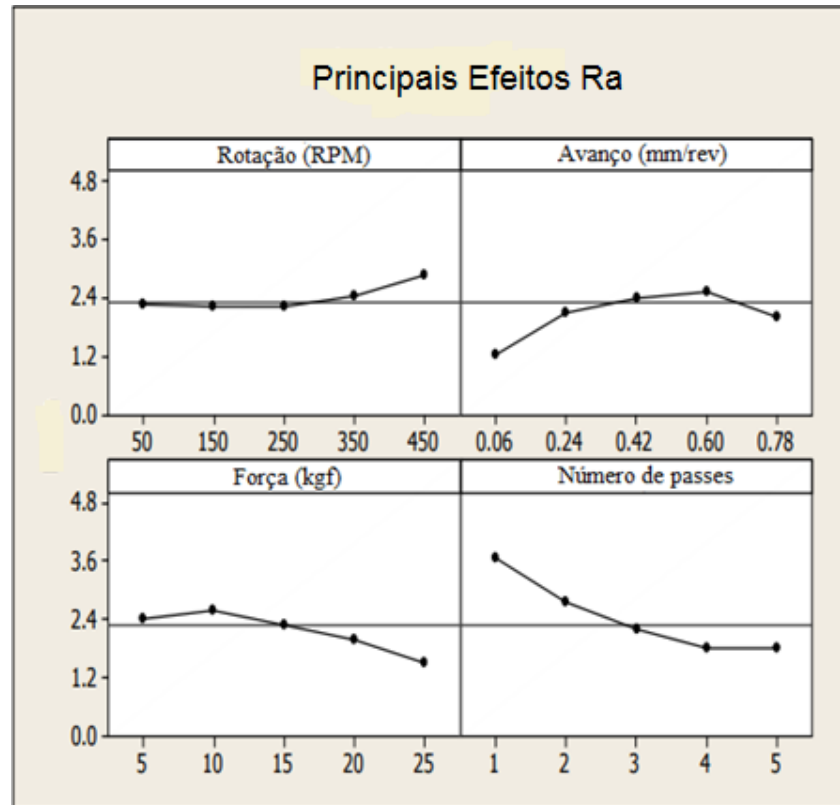


Figura 15 – Efeitos principais para Rugosidade Ra ( $\mu\text{m}$ ). (PATEL et al., 2014).

## 2.4 Microdureza no processo de roleteamento

A deformação plástica causada na superfície da peça durante o roleteamento ocorre quando a pressão exercida pela ferramenta ultrapassa a tensão limite de escoamento do material roleteado (CHAUDHARI *et al.*,) 2015. O encruamento resultará no acréscimo de dureza na camada mais superficial da peça, aumentando sua resistência ao desgaste e sua resistência mecânica.

Destaca-se que, em comparação dos processos convencionais de usinagem, o roleteamento é capaz, além de melhorar o acabamento, aumentar a dureza da superfície, independente do material trabalhado. Um exemplo disso, foi a pesquisa realizada por Akkurt, em 2011, comparando os métodos de processamento de furo, destacando essa vantagem da utilização do roleteamento pela Figura 16.

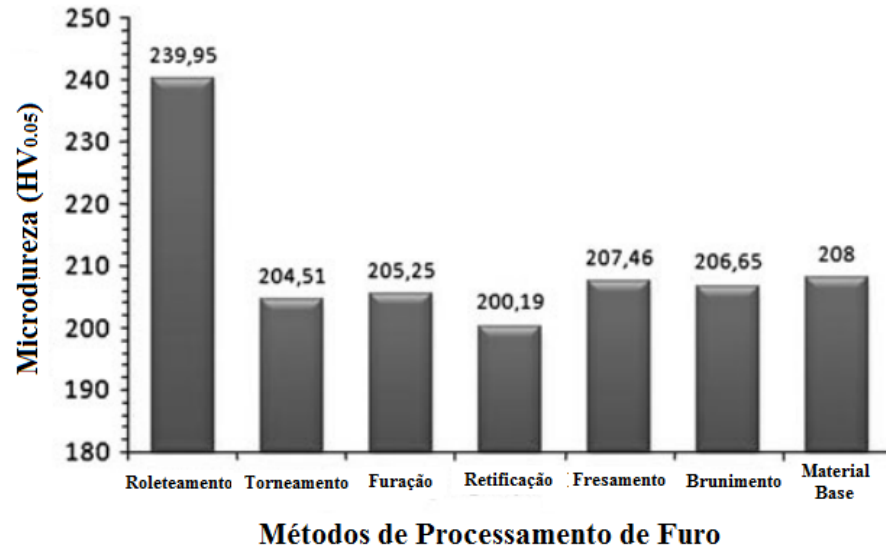


Figura 16 - Comparação dos valores de dureza superficial de acordo com o método de processamento. (AKKURT, 2011)

Cobanoglu & Ozturk (2015), realizando ensaios num aço AISI 1040, de dureza inicial igual a 170 Hb, estudou o efeito da velocidade de rotação, força de contato aplicada e da taxa de avanço na dureza final da peça roleteada. Verificou-se, pela figura 17, que a força de contato possui a maior influência entre os três parâmetros estudados, seguida da velocidade de roleteamento e da taxa de avanço. Mostrou-se também que, diferente da diminuição da rugosidade, o aumento do parâmetro de força no processo só é favorável ao acréscimo de dureza e que um acréscimo no avanço e na velocidade de roleteamento pode aumentar a microdureza superficial. Destaca-se que nas melhores condições entre as utilizadas, houve um incremento de até 55,5% na dureza em relação ao valor inicial da peça,

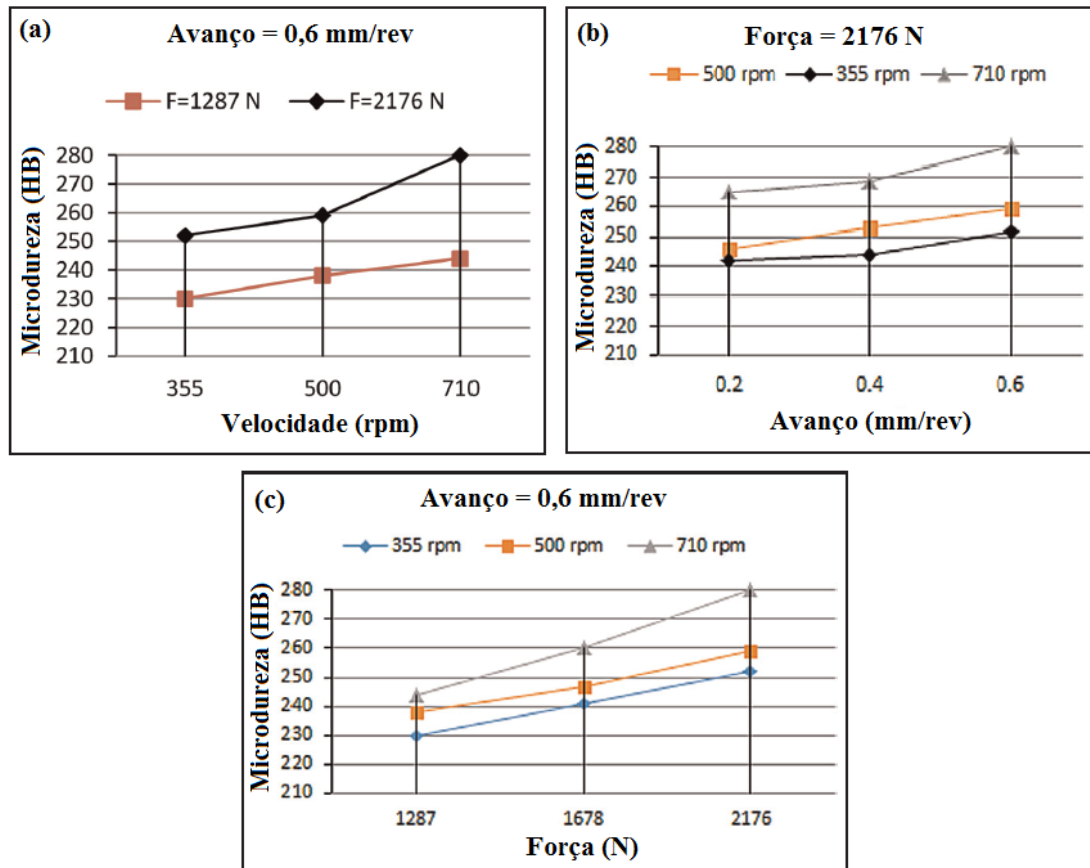


Figura 17 – (a) Microdureza versus velocidade; (b) Microdureza versus avanço; (c) Microdureza versus força. (COBANOGLU & OZTURK, 2015).

Rao *et al.* (2011), investigaram experimentalmente a influência dos passes do roleteamento por esfera e por rolo na dureza superficial dos corpos-de-prova de bronze. Verificou-se, a partir da Figura 18, que as peças têm sua dureza aumentada com o maior número de passes, tanto no roleteamento por esferas, quanto por rolo. Isso ocorre porque, com o acréscimo desse parâmetro do processo, a superfície metálica é continuamente deformada, aumentando seu encruamento e, conseqüentemente, sua dureza. Entretanto deve ser mencionado que a dureza máxima superficial tende se a estabilizar com altos valores de passes, isto porque todos os metais têm uma capacidade definida para a deformação à frio e, ao tentar ultrapassar essa capacidade, consideráveis trincas serão desenvolvidas dentro da superfície do material e, provavelmente, ocorrerá sua quebra (RAO *et al.*, 2011).

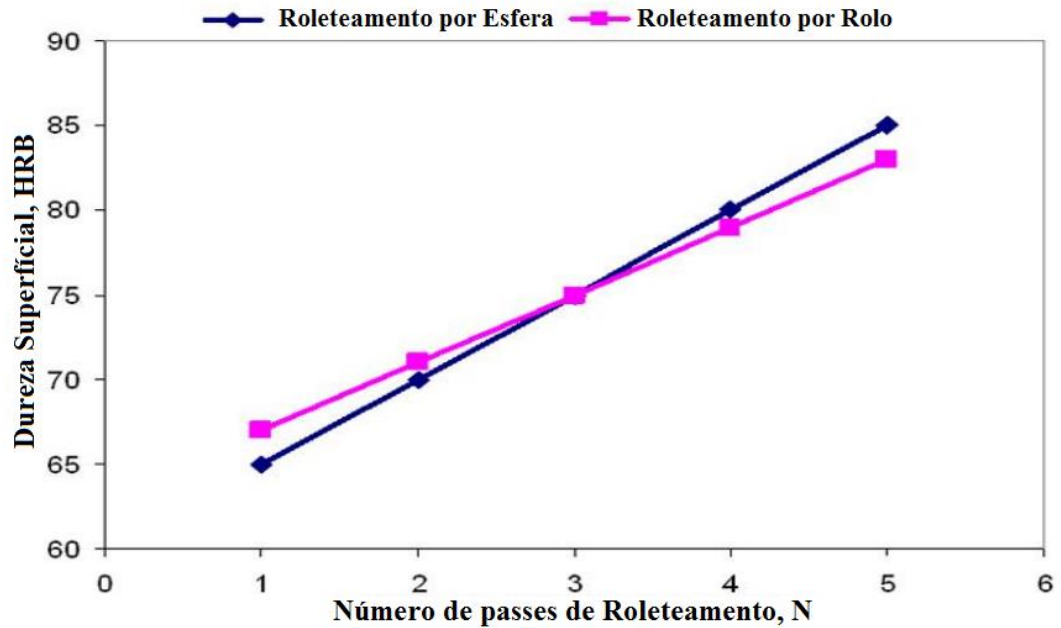


Figura 18 – Variação da dureza superficial pela influência do número de passes aplicados.

(RAO et al., 2011).

## 2.5 Tensão Residual no processo de Roleteamento

As tensões residuais podem ser medidas utilizando uma máquina de difração de Raios-X. Quando a amostra é exposta a um feixe de raios X, esse feixe interage com a estrutura cristalina do material e provoca certos padrões de difração. Existe uma relação clara entre o padrão de difração com a distância entre os planos atômicos (o espaçamento interplanar) no interior do material. Ao alterar o espaçamento interplanar, diferentes padrões de difração serão obtidos. Alterar o comprimento de onda do feixe de raios-X resultará também em um padrão de difração diferente. O espaçamento interplanar de um material que é livre de tensão irá produzir um padrão de difração característico do material. Quando um material é tensionado, alongamentos e contrações são produzidos dentro da rede cristalina, que irão causar uma mudança no padrão de difração. Por medição precisa desta mudança de padrão, a mudança no espaçamento interplanar pode ser avaliada e, assim, a tensão dentro do material deduzida. Para fazer isso, precisa-se estabelecer relações matemáticas entre o espaçamento interplanar e a tensão, relações estas que muitas vezes já estão incluídas dentro do próprio software dos difratômetros de raios-x. (FITZPATRICK et al., 2005).

Por definição, tensões residuais são as tensões existentes em um corpo sem a existência de carregamentos externos ou gradientes de temperatura. Elas existem em praticamente em todas as peças rígidas, sendo metálicas ou não (madeira, polímero, vidro, cerâmica, etc.). É o resultado do histórico metalúrgico e mecânico de cada ponto da peça e da peça como um todo durante a sua fabricação (LU, 1996).

Há um interesse crescente na forma como o estado de tensão residual afeta as propriedades mecânicas de um material e a sua estrutura. A falha de uma estrutura ou de um componente mecânico não é apenas devido a cargas externas. A tensão residual é um parâmetro importante na indústria aeroespacial, automotiva, nuclear e até de microeletrônicos. A Figura 19 mostra as propriedades dos materiais que são influenciadas pela tensão residual. (TOTTEN,2002).



Figura 19 - Efeito da tensão residual no desempenho dos materiais. (TOTTEN,2002).

A tensões residuais compressivas tendem a ser benéficas, uma vez que elas interrompem a nucleação e a formação de trincas e, conseqüentemente, previnem a falha em materiais metálicos (EL-KHABEERY & EL-AXIR, 2001). Isso ocorre, pois, as tensões compressivas contrapõem as linhas ou bandas de escorregamento que seriam provocados pela movimentação de discordâncias no reticulado cristalino do metal, diminuindo a formação de

intrusões e extrusões, dificultando a movimentação, nucleação ou a propagação de trincas (CASTRO, 2007; SUNDER, 2005).

Klocke *et al.* (2009) apresentou um trabalho sobre a influência do processo de roleteamento sobre o estado da camada superficial de uma liga de níquel, IN718, material resistente a altas temperaturas, comumente utilizado em componentes de motores aeronáuticos. Analisou-se os componentes altamente solicitados de motores de aeronaves modernas, tais como laminais de compressores e ventiladores, que devem suportar requisitos rigorosos de durabilidade e confiabilidade. A indução de tensões residuais de compressão, o endurecimento da camada de superfície e um acabamento de excelente qualidade promovido através do processo de roleteamento por rolo destes componentes revelou-se como um método muito promissor para aumentar significativamente a resistência à fadiga.

El-Khabeery & El-Axir (2001) mostraram que a menor velocidade de roleteamento (Figura 20-a), a maior profundidade de penetração (Figura 20-b) e o aumento do número de passes (Figura 20-c) causam a maior tensão residual de compressão, isso ocorre devido a maior ação de deformação dos rolos sobre a superfície da peça (liga de alumínio 6061).

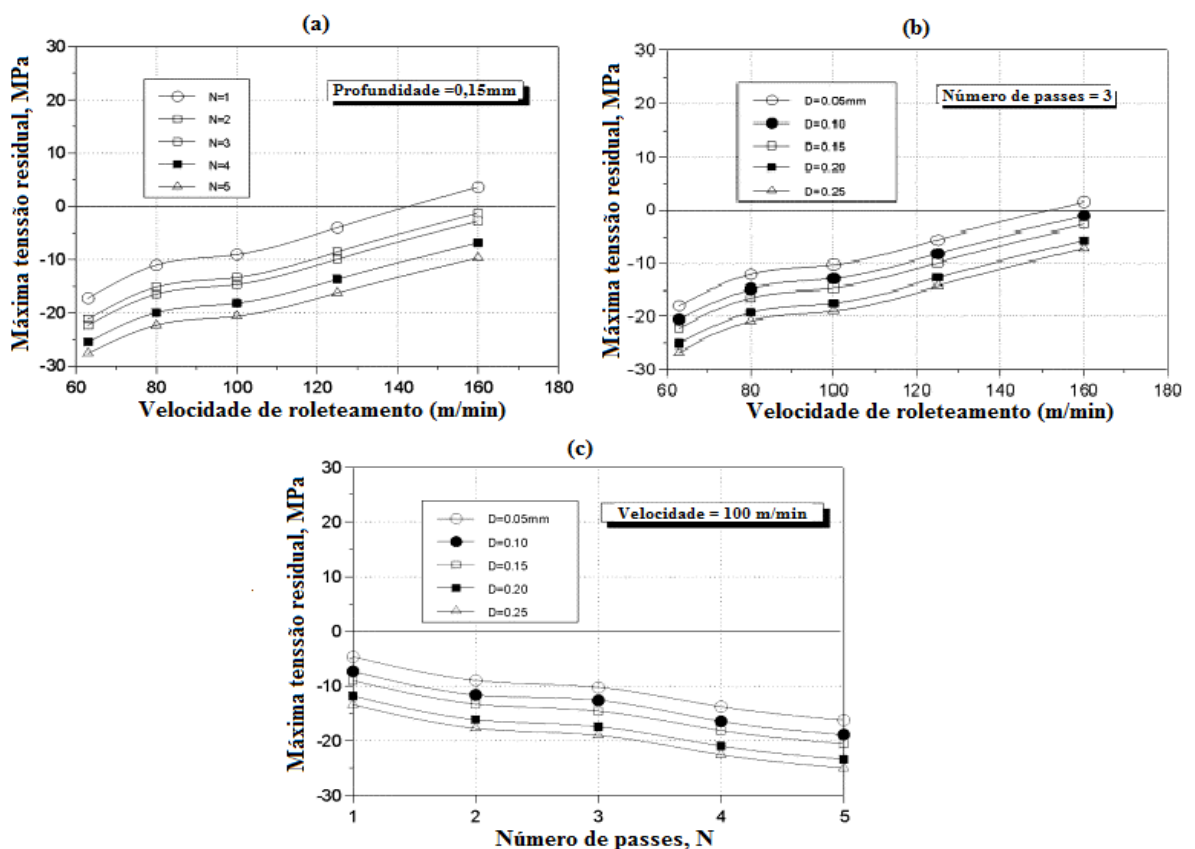


Figura 20 – Relação entre a máxima tensão residual e alguns parâmetros de roleteamento (El-Khabeery & El-Axir, 2001).

CHOMIENNE *et al.* (2016), que conduziram experimentos de roleteamento no aço inoxidável, afirmaram que tanto o avanço (Figura 21) quanto a velocidade de roleteamento (Figura 22) possuem pouquíssima influência no nível de tensão residual de compressão produzida. Além do mais, verificaram que a deformação plástica promovida não é de mesma intensidade em ambas as direções da peça. Na direção circunferencial da peça o material é deformado sempre em uma direção pela ferramenta, em virtude, somente, da força de contato aplicada. Na direção axial da peça, o material é deformado em duas direções diferentes, em ação combinada da força de contato aplicada e do avanço da ferramenta, apresentando maior tensão residual máxima de compressão.

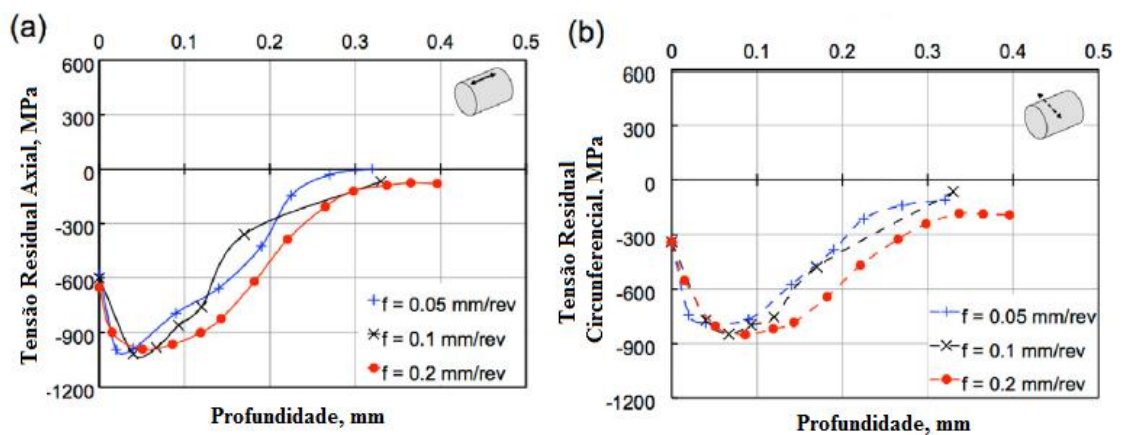


Figura 21 - Influência do avanço no perfil de tensão residual: (a) na direção axial e (b) na direção circunferencial. (CHOMIENNE *et al.*, 2016).

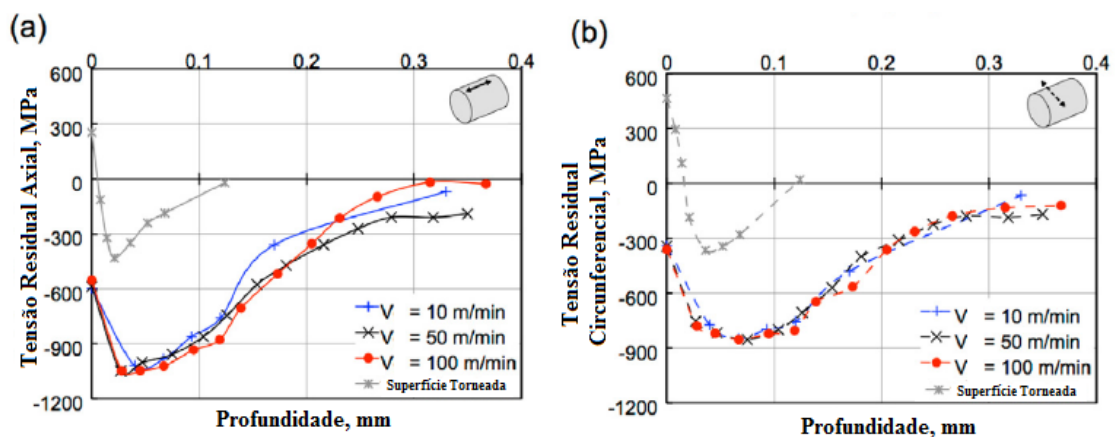


Figura 22 - Influência da velocidade no perfil de tensão residual: (a) na direção axial e (b) na direção circunferencial. (CHOMIENNE *et al.*, 2016).

Tensões residuais causadas por processos de conformação e de usinagem são definidas como macroscópicas, visto que elas são de longo alcance, se estendendo por vários grãos do material, afetando um volume considerável do material estendendo-se por área comparável as



dimensões do equipamento (SOUZA, 2012). Essas macro tensões residuais são as que mais influenciam na vida útil da peça.

É bem conhecido que os processos de usinagem, tais como torneamento, fresamento, furação e retificação, com os efeitos mecânicos e térmicos associados com a formação do cavaco, podem criar tensões residuais de tração indesejáveis nas camadas subsuperficiais das peças (ULUTAN *et al.*, 2007). Na situação em que uma peça esteja sendo submetida a esforços mecânicos cíclicos de tração, e sobre ela atue tensões residuais de tração, é provável que esse componente venha a falhar prematuramente.

A Figura 23 mostra o acréscimo de 80% da vida de fadiga de um virabrequim que teve seu pino roleteado, como consequência das tensões residuais induzidas (MURTHY & KOTIVEERACHARI, 1981).

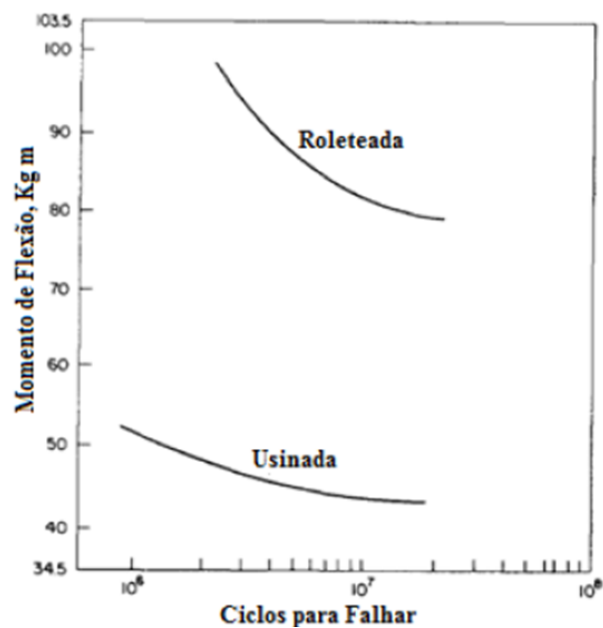


Figura 23 - Vida em fadiga de um virabrequim roleteado e não roleteado (MURTHY & KOTIVEERACHARI, 1981).

Zhang e Lindemann (2005) conseguiram por meio do roleteamento por rolo um aumento de 110 % da resistência a fadiga da liga de magnésio AZ80, alterando o limite de fadiga de 100 MPa para 210 MPa. Além disso, concluíram que o roleteamento (Rb) é um processo mais eficaz do que o jateamento de granalha (SP) quanto ao aumento da intensidade

e da profundidade da dureza superficial obtida e da tensão residual de compressão e, consequentemente, da vida em fadiga do AZ80, conforme observado pela Figura 24.

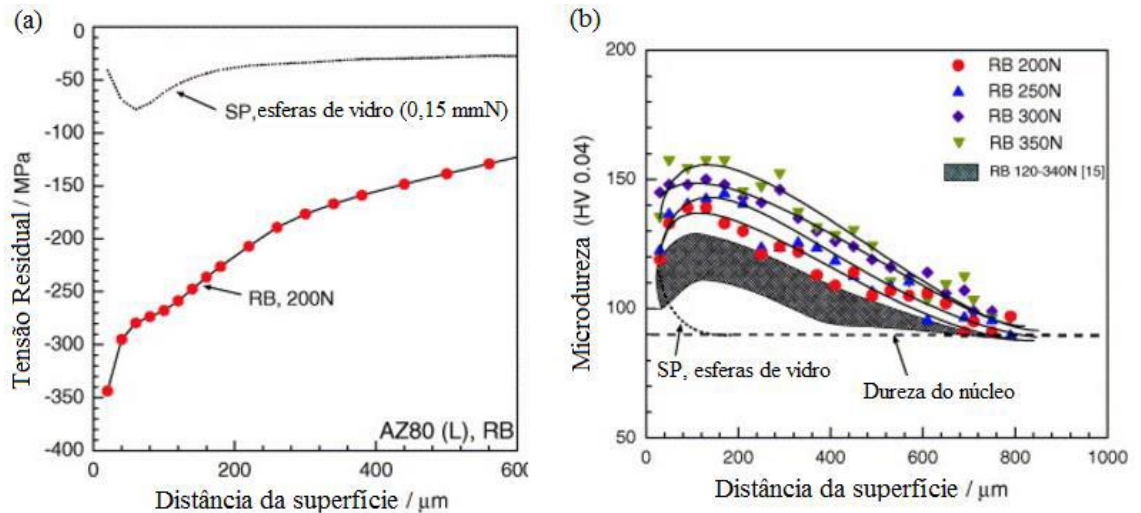


Figura 24 - (a) Comparação entre a tensão residual obtida através do roleteamento, utilizando força 200 N, e do jateamento de granalhas; (b) Comparação entre a microdureza alcançada pelo processo de roleteamento, aplicando diferentes forças, e pelo processo de jateamento. (ZHANG & LINDEMANN, 2005).

Prevý & Cammett (2001), realizando testes na liga de alumínio 7075-T6, mostraram que o roleteamento pode induzir uma camada de tensão residual de compressão em uma profundidade de 1 mm abaixo da superfície com valor máximo de 650 MPa. Tanto a profundidade e a magnitude alcançada de tensão residual de compressão obtida pelo roleteamento excede a produzida pelo jateamento de granalhas convencional visto que, através desse processo, alcançou-se somente uma profundidade de 0,2 mm e valor máximo de 350 MPa, conforme mostra a Figura 25.

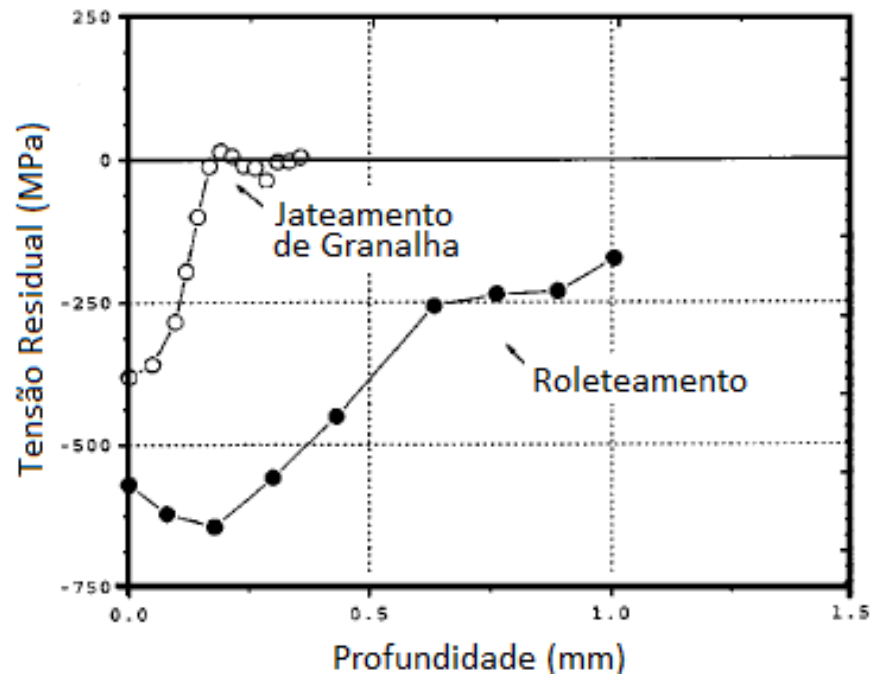


Figura 25 - Camada de tensão residual de compressão na profundidade abaixo da superfície (Prevéy & Cammett 2001).

A peça não precisa ser submetida ao roleteamento especificamente depois do processo de corrosão, mas principalmente antes, evitando que ela seja oxidada. Segundo Nazmy & Rydstad (1990) a resistência à corrosão de uma peça pode ser aumentada pelo roleteamento pelo fato de produzir na camada mais externa uma região de grãos finos e, conforme comprovado por Giggins & Pettit (1969), Arzt & Singer (1984) e Al-Qawabeha et al. (2009), os materiais com grãos finos possuem esta característica benéfica.

Os tamanhos de grãos produzidos pelo roleteamento numa liga de magnésio AZ31B foram estudados por Pu *et al.* (2012). A Figura 26 ilustra como os tamanhos de grãos são reduzidos se comparados com uma peça antes de ser roleteada.

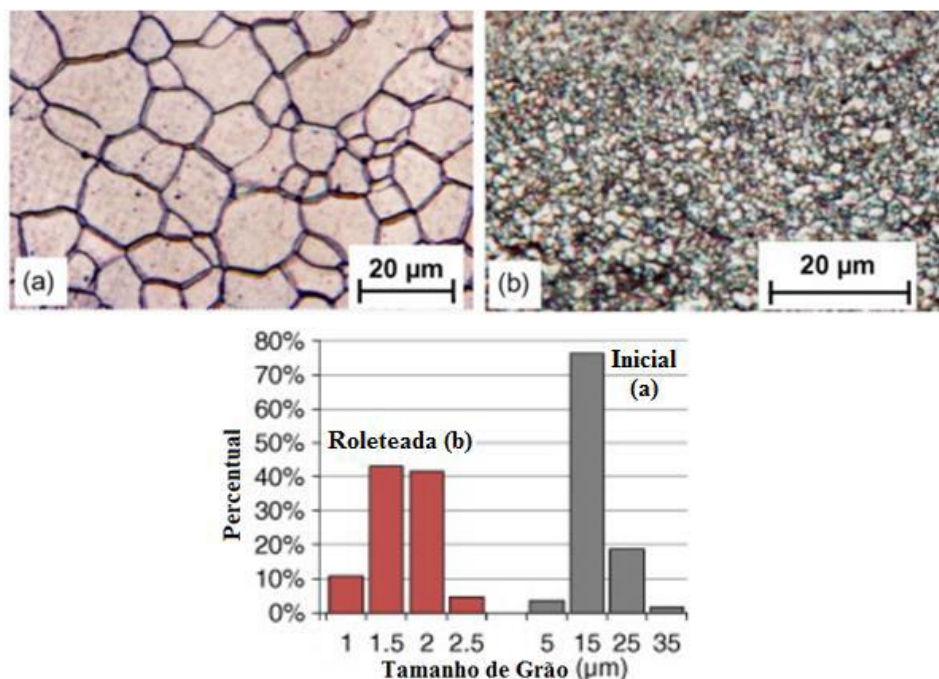


Figura 26 - Microestrutura e distribuição do tamanho de grão na superfície do material: (a) antes roleteamento; (b) depois do roleteamento (PU et al., 2012).

Prevéy et al. (2000) no Centro de Pesquisa Glenn (NASA) concluíram que o roleteamento produz uma profunda camada de compressão de alta magnitude com um encruamento mínimo e sem danos detectáveis na superfície do Inconel 718, tendo profundidade de encruamento 5 a 8 vezes maior do que o jateamento de granalhas. Destacaram que o processo de roleteamento pode deter completamente a existências de quebra por fadigas nas superligas E960 e E946 da NASA, sendo um meio eficaz para suprir o crescimento de pequenas fissuras, demonstrando um acréscimo de 30% na resistência de carga cíclica nas superligas a base de níquel.

Hadamache *et al.* (2006) afim de comparar os processos de roleteamento por esfera e por rolo executou diversos ensaios alterando os parâmetros do processo sobre o aço Rb40 (equivalente ao aço AISI 1335). Por meio deste trabalho observou-se que o roleteamento por rolo promove na rugosidade (Ra) ótimos resultados e, em termos de dureza, o roleteamento por rolo torna-se mais interessante, como visto na Figura 27 a e 27 b. Para ambos os processos, os valores de rugosidade e dureza são obtidos por um regime específico cujos parâmetros decisivos são a força de contato aplicada e o número de passes. Com base na rugosidade, recomenda-se limitar o número de passes até dois, enquanto que para a dureza é aconselhável ir até três passes, utilizando uma força de contato de 150N. O acréscimo do avanço não é desejável nem para a diminuição da rugosidade, nem para o aumento da dureza, portanto, deve-se utilizar o menor possível. As camadas superficiais do aço Rb40 tratadas com ambos os

processos apresentam uma resistência ao desgaste apreciável em relação às condições iniciais do material, antes de tratadas, como pode ser observado na Figura 28.

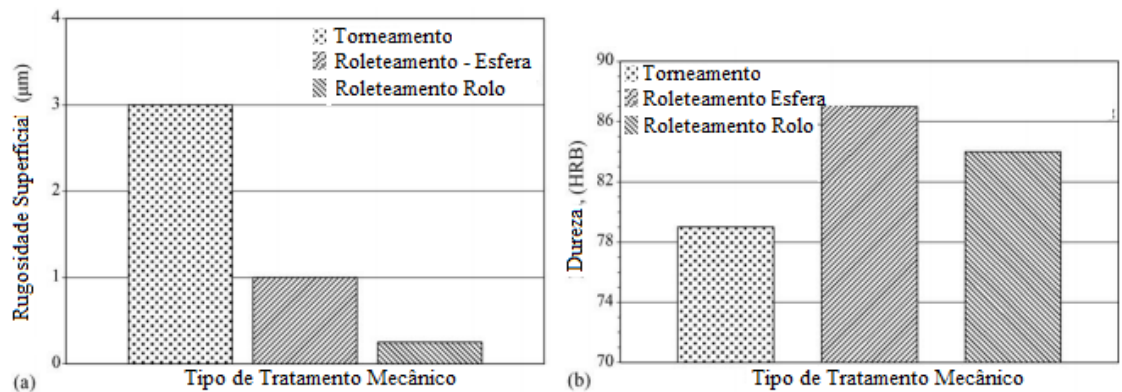


Figura 27 - Comparação entre a rugosidade superficial (Ra) e dureza em função dos tipos de tratamentos (HAMADACHE et al., 2006).

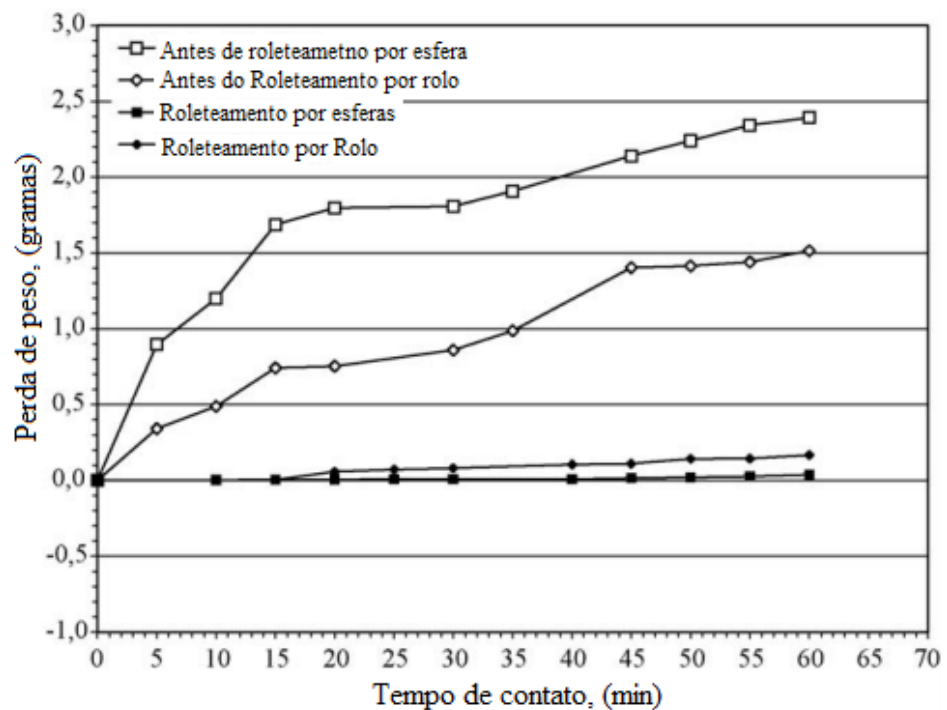


Figura 28 - Comparação da quantidade de perda de peso em função do tempo de contato da peça com um-material abrasivo (HAMADACHE et al., 2006).

Para introduzir tensões residuais de compressão, maior dureza e menor rugosidade à peça, deve-se conhecer os parâmetros que influenciam no processo de roleteamento. As variáveis capazes de modificar a qualidade superficial obtida através do processo são: a rotação da peça e o avanço da ferramenta, que vão alterar o tempo do roleteamento; a força de contato aplicada e o número de passes dado pela ferramenta, que podem alterar o nível de deformação

plástica da camada superficial; a área de contato entre a peça e a ferramenta; a lubrificação durante o processo e as condições iniciais de dureza e rugosidade da peça, alterando dessa forma a relação tribológica entre o par peça-ferramenta e a força de contato necessária para realizar a deformação plástica. Os níveis ótimos dos parâmetros utilizados são determinados na maioria das vezes através de métodos empíricos, pois ainda há grandes dificuldades em correlacionar todos os parâmetros do processo com as mudanças geométricas e mecânicas feitas à peça através da simulação por meio de elementos finitos (BALLAND, 2013).

Hassan & Maqableh (2000) estudaram o efeito dos parâmetros iniciais de dureza e de rugosidade da peça de trabalho no processo de roleteamento. Observa-se que um acréscimo na rugosidade superficial inicial causa um aumento no valor da rugosidade superficial final obtida, mas não influencia na taxa de acréscimo de dureza da peça (Figura 29). Entretanto, a maior dureza superficial inicial causa um decréscimo no grau de redução da rugosidade superficial e na quantidade total de acréscimo da dureza superficial obtida pelo roleteamento (Figura 30).

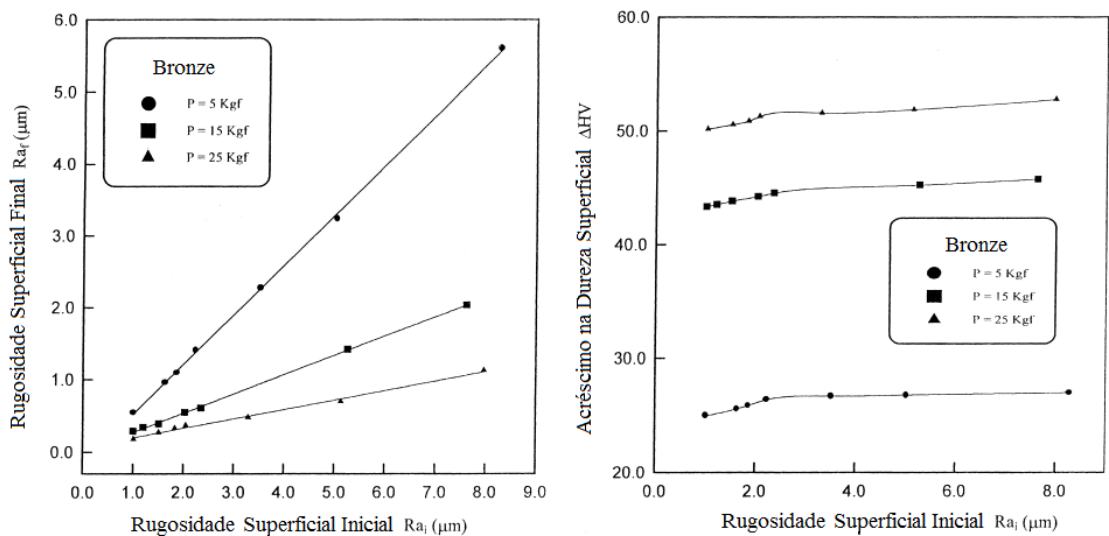


Figura 29 - Efeito da rugosidade superficial inicial para diferentes forças de roleteamento. Parâmetros de roleteamento:  $V = 23$  mm/s,  $f = 0,08$  mm/rev, Passes = 1,  $HVi = 127$ . (HASSAN & MAQABLEH, 2000).

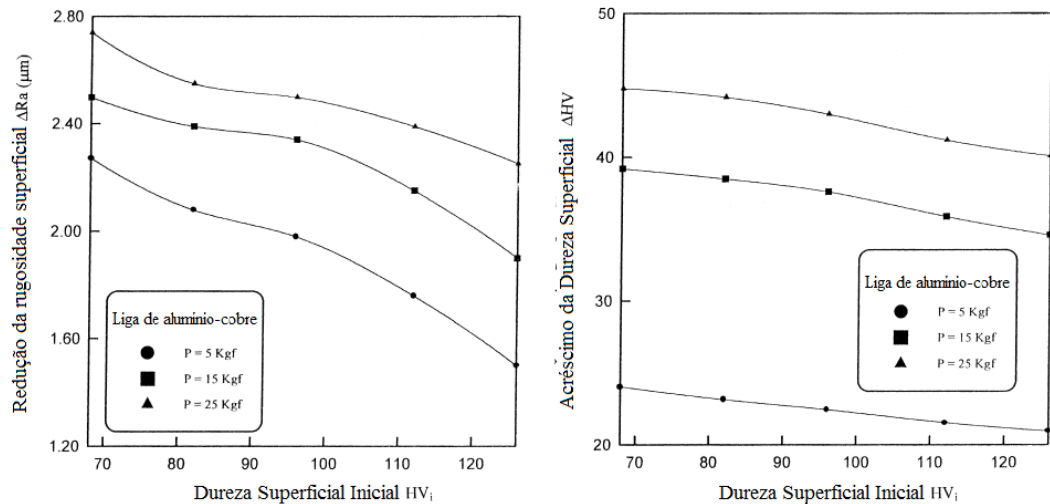


Figura 30 - Efeito da dureza superficial inicial para diferentes forças de roleteamento. Parâmetros de roleteamento:  $V = 23$  mm/s,  $f = 0,08$  mm/rev, Passes = 1, Rai =  $3,32 - 3,41$  μm (HASSAN & MAQABLEH, 2000).

Dessa forma, observando que o desempenho do processo de roleteamento depende significativamente da dureza do material e da consequente capacidade de se deformar plasticamente (HASSAN & MOMANI, 2000), o roleteamento convencional em material de alta dureza necessita da aplicação de uma força de contato excessiva a fim de ultrapassar a tensão limite de escoamento, resultando, frequentemente, em desgaste mais rápido da ferramenta, grande deflexão ou danos superficiais da peça como trincas e descamações e, conseqüentemente, piores resultados tanto de rugosidade quanto de circularidade (TIAN & SHIN, 2007; SCHULZE, 2006).

## 2.6 Desvio de circularidade

Segundo a NBR 6409 (1997) a tolerância de circularidade, representam os limites inferior e superior tolerados entre dois círculos concêntricos e coplanares afastados de uma distância que contém o conjunto de pontos do perfil analisado, os desvios de circularidade (ou ovalização) podem ocorrer na seção circular de uma peça cilíndrica. A Figura 31 representa a tolerância de circularidade. Espera-se que estes desvios de circularidade fiquem na tolerância dimensional especificada para o diâmetro da peça representado por “t”.

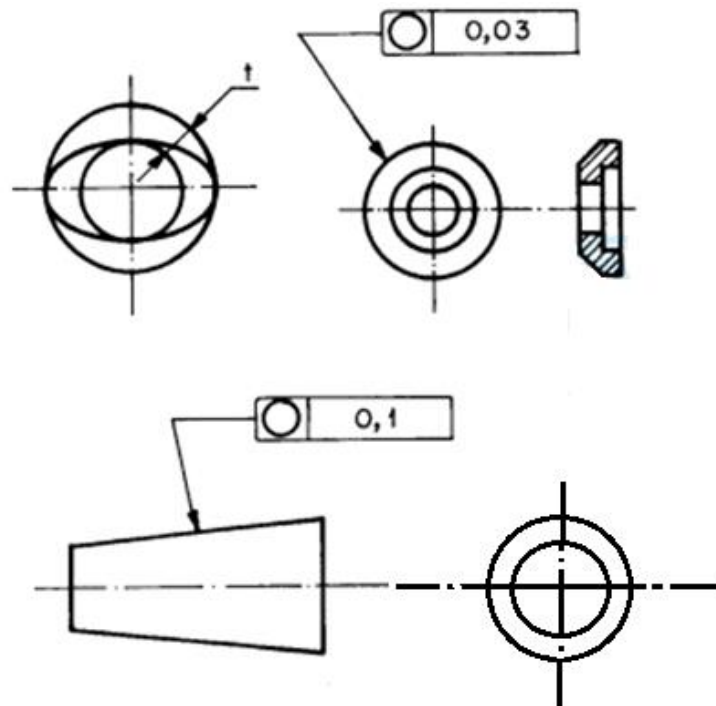


Figura 31 - Tolerância de circularidade (Fonte: NBR 6409, 1997)

Huuki & Laakso (2013) inovaram o processo de roleteamento utilizando uma plataforma ultrasônica onde fixaram a ferramenta de esfera. Baseando-se na análise de frequência ultrasônica gerada, transdutores ultrasônicos convertem a alta-frequência elétrica em vibração mecânica. Observou-se que minimizando essa vibração pode-se otimizar o processo de roleteamento, alcançando melhores resultados na rugosidade e circularidade da peça roleteada. A velocidade e o avanço utilizado no roleteamento ultrasônico foram de 80 rpm e 0,05 mm/rev, respectivamente. As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados referentes a rugosidade para os dois corpos de prova utilizados no estudo, ambos aço 34CrNiMo6-M temperado com dureza de 330 e 410 HV. Os ensaios empregando estes corpos de prova foram realizados submetendo-os a uma força de contato de 185 N para o aço de 330 HV e 195 N para o aço de 410 HV.



Tabela 2– Rugosidade da peça 330 HV ( Huuki &amp; Laakso, 2013).

No.	Superfície torneada ( $\mu\text{m}$ )	Desvio	Superfície roleteada ( $\mu\text{m}$ )	Desvio
1	1,45	0,13	0,07	0,03
2	1,64	0,06	0,15	0,05
3	1,64	0,06	0,11	0,01
4	—	—	0,06	0,04
<b>Média</b>	1,58		0,10	

Tabela 3– Rugosidade da peça 410 HV ( Huuki &amp; Laakso, 2013).

No.	Superfície torneada ( $\mu\text{m}$ )	Desvio	Superfície roleteada ( $\mu\text{m}$ )	Desvio
1	1,05	0,06	0,08	0,03
2	1,17	0,06	0,10	0,01
3	1,12	0,01	0,09	0,02
4	—	—	0,05	0,06
5	—	—	0,13	0,02
6	—	—	0,20	0,09
<b>Média</b>	1,11		0,11	

Os valores de circularidades da peça roleteada e não roleteada foram comparados. Os resultados demonstram que a superfície roleteada apresenta melhor circularidade que as superfícies que não sofreram o processo. Porém, nota-se que não houve uma relação direta com a condição inicial de rugosidade da peça torneada. A maior redução de circularidade ocorreu com a superfície inicial de  $R_a = 11,85 \mu\text{m}$ , seguido de  $R_a = 9,35 \mu\text{m}$  e, por último, de  $R_a = 12,10 \mu\text{m}$ . A Tabela 4 exhibe resumidamente os valores encontrados no estudo.

Tabela 4– Valores de circularidade ( Huuki &amp; Laakso, 2013).

No.	Superfície torneada ( $\mu\text{m}$ )	Superfície roleteada ( $\mu\text{m}$ )
1	11,55	6,50
2	9,35	5,75
3	12,10	8,25
<b>Média</b>	11,00	6,83

Stalin *et al.* (2016) investigaram, por meio da análise de método de elementos finitos (MEF), o processo de roleteamento por esfera em um aço AISI D3 (VC130) em um torno CNC, utilizando DEFORM 2D e 3D como *softwares*. Experimentalmente obteve-se uma melhora de 86,2% na rugosidade da peça após o roleteamento. O desvio mínimo e máximo entre os valores experimentais e os resultados obtidos pelo MEF para rugosidade foram de 3,22% (Avanço = 0,13 mm/rev, Força = 220 N, Número de passes = 1 e Rotação = 800 rpm) e 8,69% (Avanço = 0,13 mm/rev, Força = 220 N, Número de passes = 1 e Rotação = 1000 rpm). Foi analisado também a influência do roleteamento na circularidade da peça, após o torneamento obteve-se um desvio de circularidade de 0,0197 mm e após o roleteamento 0,0032 mm (Força = 220 N, Avanço = 0,05 mm/rev, Rotação = 1000 rpm e Número de passes = 1), alcançando uma melhora de 83,75%.

## 2.7 Influência do aquecimento na operação de roleteamento

O processo de roleteamento depende da capacidade do material se deformar plasticamente (HASSAN & MOMANI, 2000), o roleteamento convencional em material de alta dureza necessita da aplicação de uma força de contato excessiva a fim de ultrapassar a tensão limite de escoamento, resultando, frequentemente, em desgaste mais rápido da ferramenta, grande deflexão ou danos superficiais da peça como trincas e descamações e, conseqüentemente, piores resultados tanto de rugosidade quanto de circularidade (TIAN & SHIN, 2007; SCHULZE, 2006).

No torneamento de ligas de difícil usinagem, a minimização das forças e do desgaste da ferramenta de corte pode ser conseguida por meio do aquecimento da peça, a qual tem um abaixamento da tensão limite de escoamento acompanhado de diminuição da pressão específica de corte do material. Para isso, diversas técnicas são encontradas na literatura diferindo uma

das outras pela origem da fonte de aquecimento, que pode ser localmente concentrada ou distribuída na superfície da peça. Assim pode-se recorrer ao método por corrente elétrica estudada por Okoshi & Uyehara (1963), Barrow (1969) e Chen & Lo (1974), aquecimento por plasma, de König *et al.* (1990) e de Kitagawa *et al.* (1988), por chama, de Özler *et al.* (2001), por laser explorado no trabalho de Salem *et al.* (1995) e por resistência elétrica de quartzo estudado por Sanchez *et al.* (2014).

A relação da temperatura com o roleteamento já foi analisado por El-Axir e El-Khabeery (2001), os quais observaram que quando a velocidade do roleteamento aumenta, há uma melhora da rugosidade devido ao aumento da temperatura da zona deformada e, conseqüentemente, do amolecimento da camada superficial, reduzindo o atrito do conjunto peça-ferramenta.

Usinagem assistida à feixe de laser tem sido aplicada com sucesso para a melhoria das propriedades da camada superficial de peças. As vantagens do método a laser quando comparado com outros métodos de modificação da camada superficial incluem uma elevada velocidade de processamento, possibilidade de realizar o processo em ambiente aberto (ao ar), a modificação de quaisquer pequenos fragmentos ou carbonetos presentes na superfície responsáveis pela durabilidade e dureza da peça de trabalho (GRIGOR'YANTS & SAFONOV, 1989).

Partindo do princípio da usinagem assistida à laser, Tian & Shin (2007) utilizando um laser de potência máxima de 500 W, realizaram experimentos de roleteamento auxiliado por laser (RAL), conforme esquematicamente mostrado na Figura 32, comparando-o com o roleteamento convencional no aço 4140 temperado (dureza inicial de 42 HRc), 4140 recozido (dureza inicial de 94 HRb) e numa superliga multifásica denominada MP35N (dureza inicial de 45 HRc).

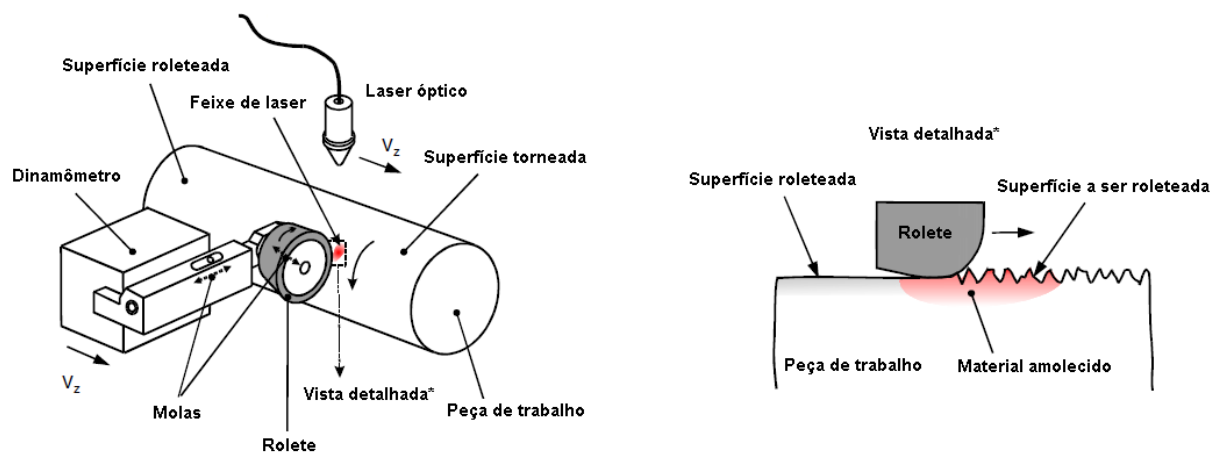


Figura 32 - Esquema do processo de roleteamento auxiliado por laser (Tian & Shin, 2007).

As forças de contato normais de roleteamento utilizadas foram de 200, 300 e 500N com as potências de laser empregadas de 200, 350 e 500W, as quais produziram temperaturas superficiais na peça de 80, 120 e 180°C, respectivamente. Como consequência do processo híbrido proposto, pode-se resumidamente destacar que o Roleteamento a laser é capaz de reduzir a razão entre a força de avanço e a força normal ( $F_f/F_n$ ), levando a um menor desgaste da ferramenta no roleteamento a laser do que no roleteamento convencional (Figura 33); comparado ao seu equivalente convencional, o roleteamento a laser melhora substancialmente o acabamento superficial, particularmente para materiais duros, por causa do amolecimento do material da peça o que permite deformação plástica superficial mais intensa para uma mesma força (Figura 34); quando a temperatura durante o roleteamento a laser alcança valor um pouco mais baixo do que a temperatura de revenimento do material da peça, o processo pode produzir dureza mais alta na camada superficial da peça, por causa do maior encruamento da peça devido ao amolecimento temporário do material da peça pelo aquecimento localizado do laser; o roleteamento a laser também gera grandes tensões residuais de compressão na superfície da peça em comparação com as peças produzidas no roleteamento convencional.

Radziejewska et al. (2008) realizaram estudos sobre a influência do roleteamento assistido à laser na superfície de uma peça de aço carbono C45 (equivalente AISI 1045), e observaram que com a aplicação do feixe de laser havia maior facilidade de deformações plásticas nas camadas superficiais quando comparado ao processo convencional, exigindo menores cargas e conseqüentemente menor chance de ocorrência de descamação durante o roleteamento a quente.

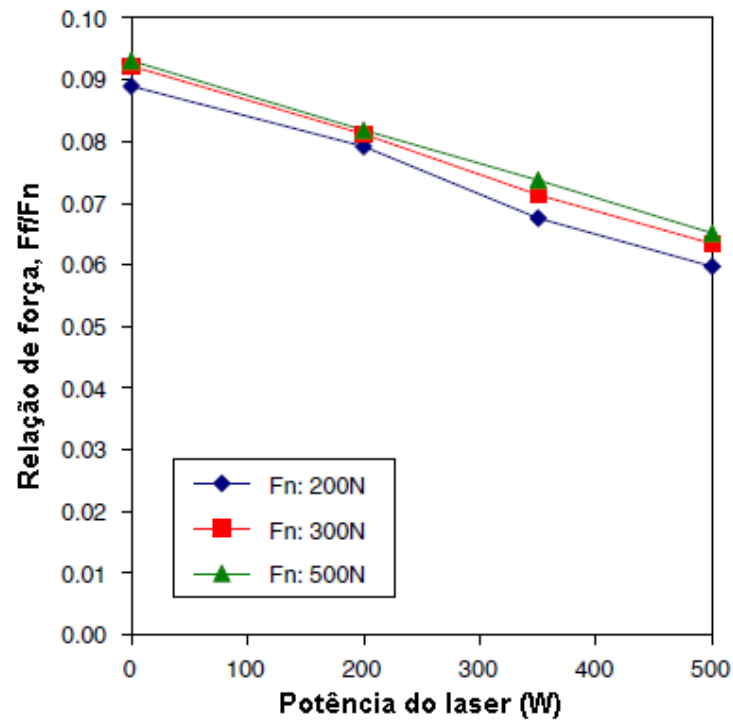


Figura 33 - Relação (razão) de força  $F_f/F_n$  no aço 4140 recozido (Tian & Shin, 2007).

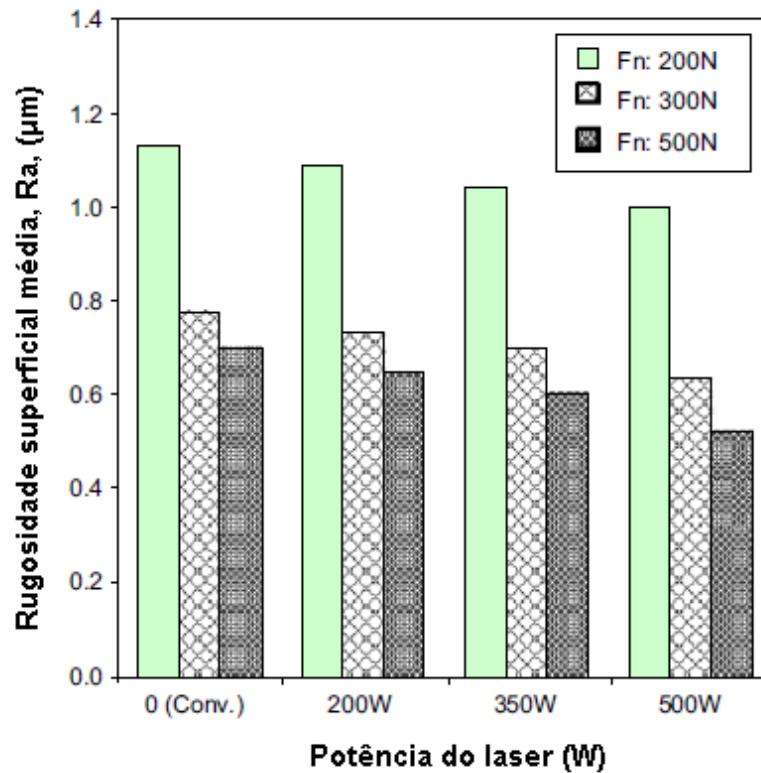


Figura 34 - Rugosidade do aço AISI 4140 temperado após o roleteamento (Tian & Shin, 2007).

Porém, o processo de roleteamento assistido a laser é de alto custo, devido ao equipamento de emissão de feixe, além disso este ocupa grande espaço físico ao redor da máquina ferramenta, assim como em outros métodos de aquecimento, como plasma, corrente elétrica e chama. Face essas dificuldades, se torna desejável uma solução mais simples e econômica do que a oferecida pelos métodos descritos e que tenha ao menos um melhor desempenho que o roleteamento convencional. Neste contexto, este trabalho de roleteamento assistido por radiação infravermelha, utilizando para isso de três resistências elétricas em quartzo de baixo custo, as quais tem como importante propriedade o aquecimento somente de corpos opacos e não a atmosfera transparente, ou mesmo translúcida, ao seu redor, com suporte para essas resistências de forma que o espaço físico ao redor da máquina ferramenta seja ínfimo, facilitando a operação e diminuindo riscos ao operador.

Neste contexto, o presente trabalho buscou estudar os efeitos do aquecimento durante o processo de roleteamento, utilizando-se de resistências elétricas de quartzo como fonte de aquecimento, as quais quando comparadas com o equipamento de feixes de laser, são de menor custo e ocupam menor espaço físico ao redor da máquina. Abrigando parâmetros de entrada como força de contato, rotação e número de passes a pesquisa irá, metodologicamente, investigar a influência do aumento da temperatura na variação das condições iniciais do material trabalhado, abordando sobre questões pouco discutidas, como a influência do roleteamento a quente sobre o desvio de circularidade, rugosidade, microdureza e tensão residual da peça de trabalho.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para cumprir os objetivos do trabalho por meio da realização de ensaios de roleteamento convencional e a quente foram necessários, basicamente, contar com um torno convencional, resistências elétricas, ferramenta de roleteamento e dinamômetro para ajuste da aplicação da força de roleteamento.

O torno convencional trata-se do modelo TORMAX 30, da Romi, no qual foi instalado um dinamômetro da marca Kistler, modelo 9257BA. No dinamômetro foi fixada a ferramenta de roleteamento, conforme pode-se observar na Figura 35.

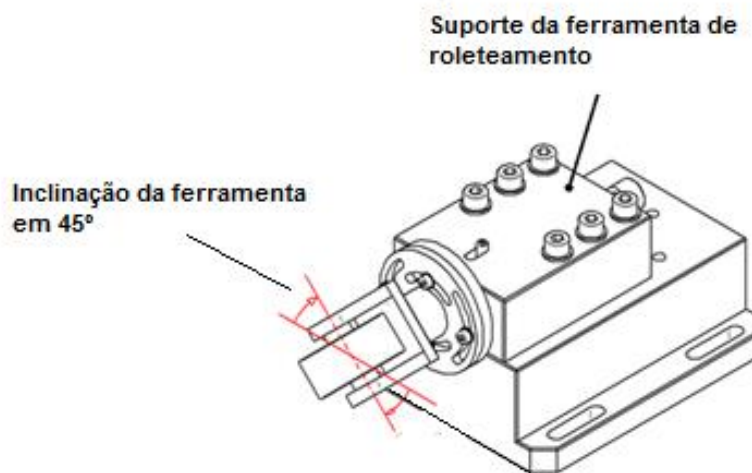


Figura 35 – Ferramenta de roleteamento acoplada a um dinamômetro.

A ferramenta de roleteamento foi previamente projetada e construída em trabalho de iniciação científica FAPESP pelos alunos Fabrício Giaretta (processo 15/21516-0) e Lucas Gomes Nogueira (processo 15/21423-2). Esta ferramenta é composta de uma mola interna, arruela de nylon para absorção de vibrações, ela é montada em um suporte, que é fixado sobre o dinamômetro seguindo a configuração demonstrada na Figura 36. Tanto a forma quanto a dimensão da ferramenta foram estabelecidas para sua adequada fixação sobre o dinamômetro com o propósito de realizar os ensaios de roleteamento medindo as forças durante o processo. A ferramenta de roleteamento permite a inclinação em relação ao eixo axial da peça, conforme o demonstrado na Figura 35, alterando a área de contato da interface peça-ferramenta,

possibilitando aplicar maiores ou menores pressões com uma mesma força, alterando as taxas de deformações da peça, os esforços e o desgaste da ferramenta.

O aquecimento do corpo de prova foi feito por meio de três resistências de quartzo com 500 Watts de potência cada uma, modelo GC 500/220, fabricado pela empresa Eletrothermo. Estas resistências, as quais emitem radiação infravermelha, foram montadas ao redor do corpo de prova. O esquema de montagem das resistências em torno da peça é ilustradamente mostrado na Figura 36.

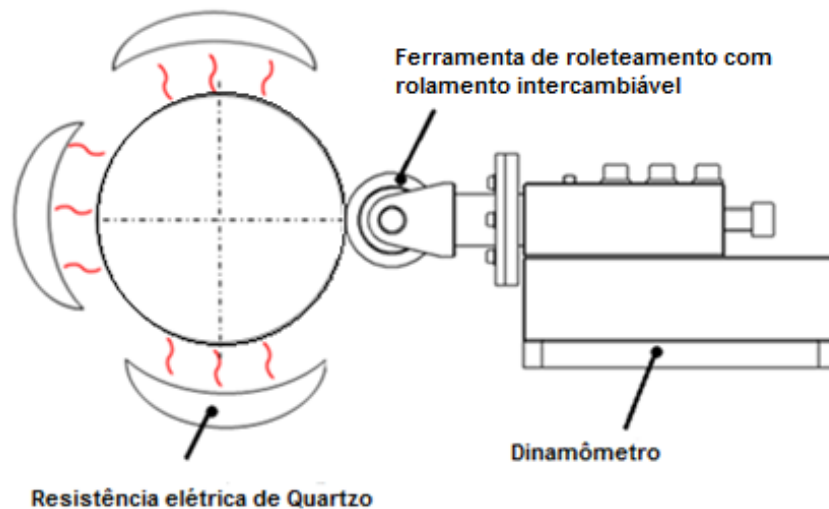


Figura 36 - Esquema da montagem do roleteamento a quente.

### 3.1 Confeção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram feitos em inonel 718 (ASTM B637) com dureza de 39 HRc. Este material é indicado para a confecção de peças empregadas em turbinas a gás, aeronaves, reatores nucleares, entre outros. A geometria dos corpos de prova foi criada a fim de dividi-los em quatro partes, sendo que em cada uma delas foi submetida a uma condição de roleteamento diferente. O desenho da peça e sua confecção podem ser vistas nas Figuras 37 e 38, respectivamente.

Antes de iniciar os ensaios de roleteamento, a peça sofreu um passe de regularização para padronizar a superfície, especialmente quanto ao valor de rugosidade e desvio de circularidade. Os parâmetros de entrada utilizados estão dispostos na Tabela 5, os quais produziram uma rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) de  $0,6 \mu\text{m}$  e um desvio de circularidade média de  $7,64 \mu\text{m}$ .



Tabela 5 - Condições de corte para preparação do corpo de prova

Velocidade corte (m/min)	Avanço – $f$ (mm/rev)	Profundidade de corte $a_p$ (mm)	Ra prova torneado do corpo de ( $\mu\text{m}$ )	Circularidade ( $\mu\text{m}$ )
140	0,062	1	0,6	7,6

A composição química do material, em peso, é apresentada na Tabela 6. Estes dados foram fornecidos pelo fabricante, a indústria Villares Metals.

Tabela 6 - Composição Química Inconel 718 (% em peso).

Co	Cr	Mo	Nb+Ta	Al	Ti	Fe	Mn	Cu	Si	C	B	Ni
0,18	19,0	3,0	4,97	0,5	0,9	18,5	0,08	0,30	0,09	0,04	0,001	Bal.

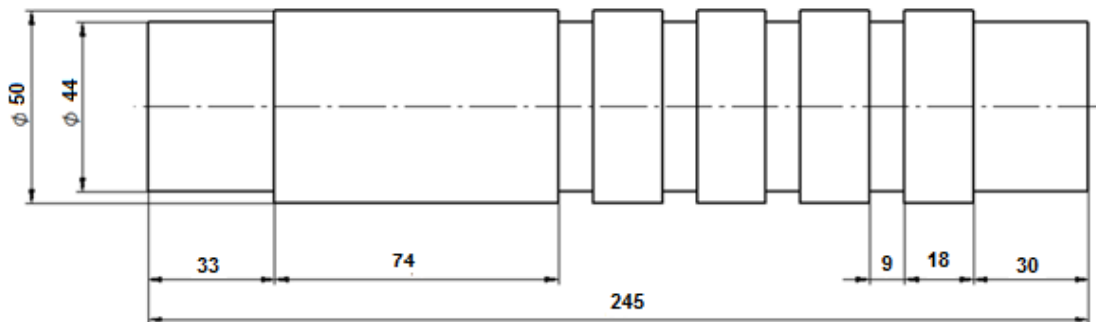


Figura 37 - Geometria dos corpos de provas (medidas em mm).

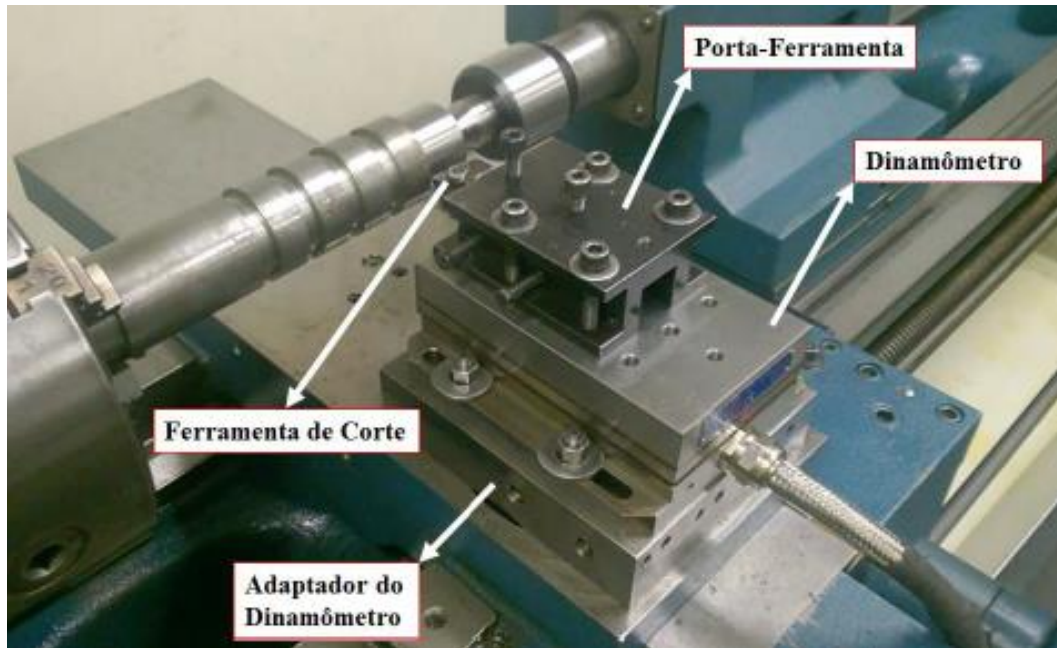


Figura 38 - Torneamento antes do processo de roleteamento.

### 3.2 Análise Estatística dos Ensaio Preliminares

Os ensaios preliminares foram conduzidos com o roleteamento convencional, segundo os valores dos parâmetros de entrada dispostos na Tabela 7. Para cada combinação de rotação da peça, número de passes dados e força de roleteamento aplicada obteve-se como variável de saída a rugosidade ( $R_a$ ) da peça roleteada.

Tabela 7 - Condições de roleteamento para os ensaios preliminares.

Material	Avanço (mm/rev)	Força de roleteamento (N)	Velocidade de corte (m/min)	Número de passes
Inconel 718	0,062	350	28	1
		550	88	2
		850	220	3
				4

Os ensaios preliminares foram executados com a combinação de todos os parâmetros apresentados na Tabela 7, realizados na condição de roleteamento convencional, sem aquecimento. Foi mantido um avanço de 0,062 mm/rev e inclinação da ferramenta (rolo) em 45°, variando os parâmetros de força de roleteamento, rotação e número de passes dados conforme Figura 39. A rugosidade média aritmética (Ra) final obtida do corpo de prova foi avaliada, lembrando que a rugosidade inicial, média, de todas as peças foi de 0,6  $\mu\text{m}$ .

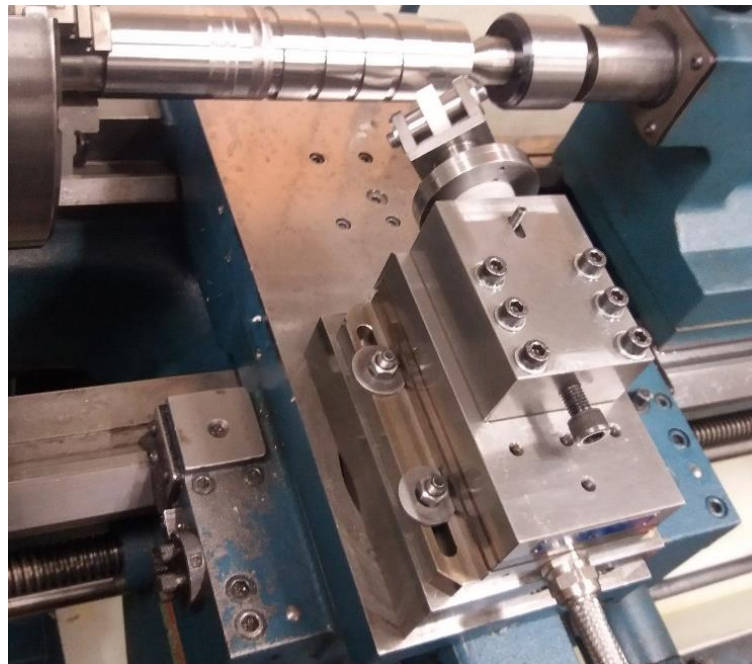


Figura 39 – configuração roleteamento convencional

Na ferramenta de roleteamento foi montado um rolamento resistente a altas temperaturas, designação 6202 ZZ 270CL ENC, o qual é o responsável pela aplicação da força de roleteamento sobre a peça. Esse rolamento possui tratamento superficial de fosfato de manganês, no entanto apresentou um alto grau de vibração durante o uso, devido, provavelmente, à baixa rigidez. Por esta razão, optou-se por um rolamento especial, feito de material cerâmico (óxido de zircônia), designação 6202-2Z, o qual mostrou-se adequado para o uso, tanto no roleteamento convencional quanto a quente.

Para a lubrificação da operação de roleteamento convencional, foi utilizado um fluido de corte semi-sintético aplicado por gotejamento. Após vários ensaios preliminares, foi encontrada um valor de diluição que permitiu uma rugosidade mais baixa, que se deu na proporção de 1:10. Os resultados obtidos para os diferentes valores dos parâmetros de entrada são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Rugosidade (Ra) obtida nos ensaios preliminares.

Pré-ensaio	Força (N)	Rotação (rpm)	Número de passes	Rugosidade final - Ra ( $\mu\text{m}$ )
1	350	180	1	0,792
2	350	180	2	0,661
3	350	180	3	0,583
4	350	180	4	0,544
5	350	560	1	0,737
6	350	560	2	0,652
7	350	560	3	0,457
8	350	560	4	0,356
9	350	1400	1	0,335
10	350	1400	2	0,260
11	350	1400	3	0,254
12	350	1400	4	0,253
13	550	180	1	0,413
14	550	180	2	0,351
15	550	180	3	0,314
16	550	180	4	0,275
17	550	560	1	0,517
18	550	560	2	0,420
19	550	560	3	0,320
20	550	560	4	0,231
21	550	1400	1	0,378
22	550	1400	2	0,235
23	550	1400	3	0,206
24	550	1400	4	0,182
25	850	180	1	0,335
26	850	180	2	0,237
27	850	180	3	0,191

28	850	180	4	0,149
29	850	560	1	0,274
30	850	560	2	0,181
31	850	560	3	0,132
32	850	560	4	0,112
33	850	1400	1	0,262
34	850	1400	2	0,180
35	850	1400	3	0,121
36	850	1400	4	0,115

Os parâmetros que mais influenciaram na obtenção de um melhor acabamento superficial do corpo de prova foram: rotação de 1400 rpm; força de 850 N; e número de passes igual a 4. Porém, a rotação de 1400 rpm mostrou-se alta, uma vez que produziu elevado nível de vibração prejudicando o acabamento superficial. Logo, optou-se em executar um maior número de ensaios finais utilizando a rotação de 560 rpm, ao invés de 1400 rpm. Além disso, para a força de 850 N e rotações de 560 rpm e 1400 rpm, as rugosidades no quarto passe são bastante próximas.

Na configuração do ensaio aquecido, a fim de evitar danos no dinamômetro, que poderiam ser provocados pela radiação infravermelha emitida pelas resistências elétricas, optou-se por colocar uma proteção de manta asfáltica aluminizada sobre ele. Sua cobertura de alumínio gofrado flexível de alta resistência permite uma impermeabilização e assegura a reflexão dos raios UV, tornando-se um bom isolante térmico e impedindo que o dinamômetro sofra aquecimento excessivo. O conjunto instalado para a realização dos ensaios a quente está representado na Figura 40.

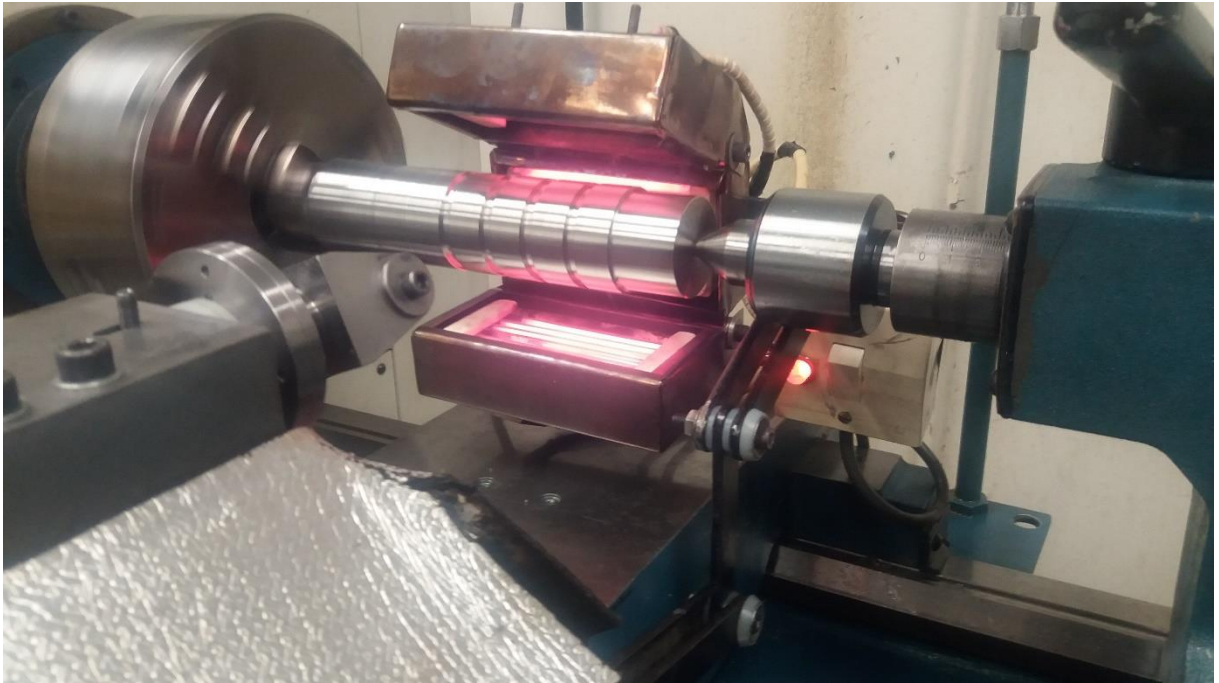


Figura 40 – Configuração exclusiva para roleteamento a quente.

No roleteamento assistido por radiação infravermelha também existe a necessidade da aplicação de lubrificante. No entanto, os lubrificantes líquidos respingam nas resistências elétricas, danificando-as. Desta forma, optou-se por um lubrificante sólido.

A pasta lubrificante ROYAL COAT 900, aplicada com espátula em volta da peça, mostrou os melhores resultados, pois não apresentou combustão e, devido à boa consistência, também não apresentou gotejamento. Assim, optou-se por utilizar essa pasta como lubrificante durante a operação a quente, conforme Figura 41.

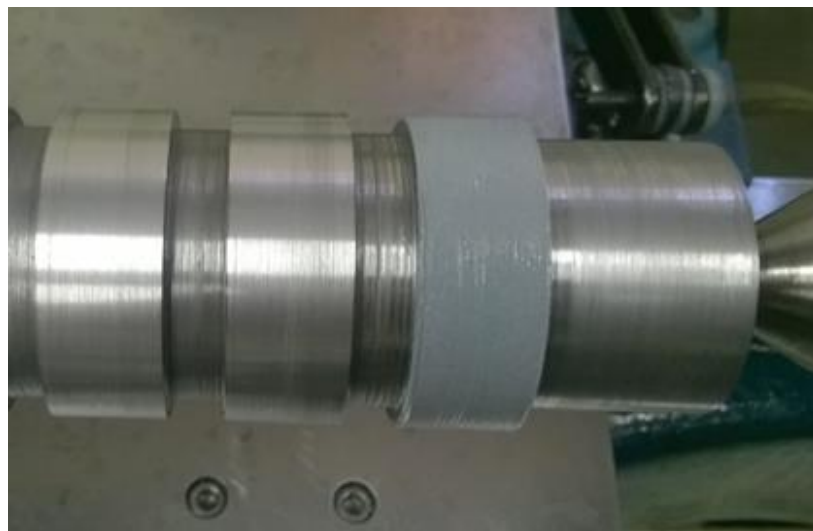


Figura 41 - Aplicação da pasta lubrificante no corpo de prova

### 3.3 Medição da rugosidade

Tanto após o torneamento, no qual procedeu-se a regularização da superfície e as condições iniciais dos ensaios, e após o roleteamento, foi medida a rugosidade, sendo utilizado o parâmetro Ra ( $\mu\text{m}$ ). Os parâmetros selecionados de comprimento de amostragem (*cutoff*) e número de comprimentos de amostragem dentro do percurso de medição foram iguais a 0,8 mm e 5 mm, respectivamente. Em volta do perímetro do corpo de prova foram realizadas três medições e, então, calculado o valor médio da rugosidade. Para a avaliação, foi utilizado o rugosímetro portátil modelo TR200, da TIME. Além do valor da rugosidade, também foi levantado o perfil da superfície do corpo de prova (rugosidade bruta) por meio de um perfilômetro Form Talysurf, da Taylor Robson, modelo i30.

### 3.4 Preparação das amostras

Foram feitas separações de porções dos corpos de provas para preparação de amostras embutidas em resina termofixa para observação em microscópio, medição de microdureza e tensão residual. Para isso foi usado um disco de corte atuando nas direções transversal do corpo de prova e, posteriormente, horizontal, conforme ilustrado na Figura 42. Em seguida deu-se a preparação.

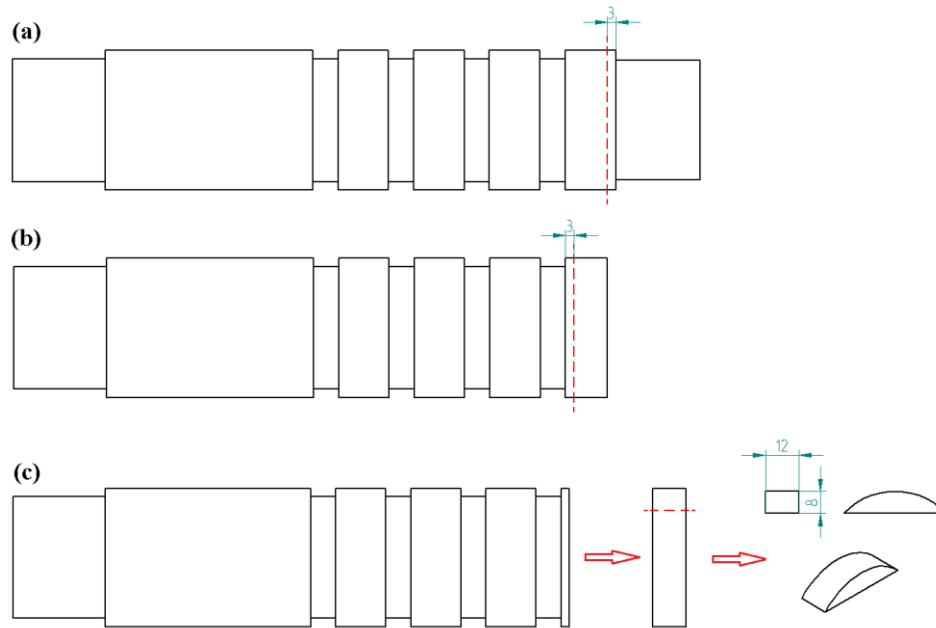


Figura 42 - Etapas para obtenção da amostra.

Depois do embutimento das amostras, foi realizado o processo de lixamento com lixas de granulação de 120, 220, 320, 400, 500, 600, 1200 e 1500 mesh, nesta ordem. Posteriormente, fez-se o polimento utilizando grãos de alumina de  $1\mu\text{m}$  de diâmetro, da AROTEC, e uma politriz da marca STRUERS, com rotação regulável de 500 ou 1000 rpm.

### 3.5 Medição de Microdureza

A medição de microdureza foi realizada na escala Vickers. O equipamento utilizado foi o MicroWizhard versão 1.04 da marca Mitutoyo. Esse microdurômetro faz o cálculo automático da microdureza na escala Vickers ao selecionar determinada carga de aplicação e serem medidas as diagonais da indentação impressa, com o auxílio da lente microscópica presente no equipamento.

O valor da distância entre a extremidade da peça e a primeira indentação, assim como entre as demais indentações deve ser de, no mínimo, duas vezes o valor da maior diagonal impressa pelo indentador. Dessa forma, a carga e o tempo aplicado foi respectivamente de 20g e 10s, relativamente baixa a fim de produzir pouca deformação na camada mais próxima da borda da amostra, aonde se encontra a superfície roleteada, possibilitando, também, uma boa visualização das diagonais impressas e, conseqüentemente, uma medição precisa. Tal procedimento teve como diretriz a norma ASTM E92.



Para investigar o encruamento na superfície do corpo de prova, onde a ferramenta passou, foram feitas medidas da microdureza. Antes, porém, várias cargas foram testadas até que se chegou ao valor de 10g para que as duas diagonais do indentador ficasse do mesmo tamanho, dessa forma foi possível realizar a medição na superfície da peça.

### **3.6 Análise metalográfica**

Para análise metalográfica dos corpos de prova, foram realizados ataques químicos utilizando Glicerégia na proporção de 3: HCl, 2: Glicerol, 1: HNO<sub>3</sub>, em imersão durante 60 segundos, aproximadamente. A microscopia foi realizada em microscópio óptico Olympus, modelo BX51.

### **3.7 Medição de circularidade**

O desvio de circularidade do corpo de prova tanto torneado, em sua condição inicial de ensaio, quanto depois, após roleteado em 4 quatro passes, foi medido por meio de uma máquina de medição de circularidade da marca Taylor Hobson, modelo Talyrond 31. Em cada parte do corpo de prova foram realizadas três medições em diferentes alturas e, então, calculado o valor médio do desvio. O desvio de circularidade médio, medido após o torneamento, o qual foi condição inicial para os ensaios de roleteamento, foi de 7,64  $\mu\text{m}$ .

### **3.8 Análise da Tensão Residual**

As tensões residuais foram medidas e analisadas no Laboratório de Análises de Tensões - LAT, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFF – Universidade Federal Fluminense, por meio da técnica da difração de raios-X utilizando o método  $\text{sen}2\Psi$ . Para isso foi usado o analisador Xstress3000, fabricado pela Stresstech.

Foram realizadas leituras sob cinco ângulos de inclinação ( $\psi$ ) em cada ponto. O *software* do analisador de tensões determina o valor da tensão, bem como a incerteza subjacente em cada local analisado.

Para cada ponto medido, foram feitas cinco leituras que relacionam a distância interplanar ( $d$ ) com ângulo de inclinação ( $\psi$ ). A tensão residual no ponto é a média das cinco leituras e as margens de erro são calculadas em relação à linha de tendência.

As medições foram feitas sobre a superfície, no centro de cada amostra, na direção longitudinal (L) e transversal (T) à direção de roleteamento (Figura 43). Os parâmetros utilizados para as medições estão apresentados na Tabela 9.

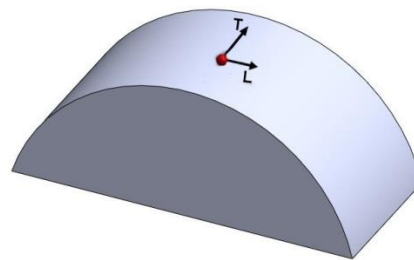


Figura 43 - Região de análise das tensões residuais nas amostras.

Tabela 9 - Parâmetros utilizados no sistema de análise das tensões residuais.

Diâmetro do Colimador (mm)	2
Ângulo de incidência ( $2\theta$ )	133,66°
Plano de difração {hkl}	(220)
Radiação	CrK $\alpha$
Comprimento de onda ( $\lambda$ ) CrK $\alpha$	2,291 Å
Corrente (mA)	6,7
Tensão (kv)	30
Inclinação $\psi$ (°)	0; 20,7; 30; 37,8; 45
Tempo de exposição (s)	15

### 3.9 Procedimento experimental

Inicialmente, o corpo de prova foi posto em aquecimento no torno sob rotação de 100rpm. Utilizando um sensor composto por um termopar do tipo K, fez-se medições na

superfície da peça em intervalos de 2 min, durante 12 minutos, mostrando-se tempo suficiente para a estabilização da temperatura, a qual alcançou 310 °C. Em seguida, seguiu-se o seguinte procedimento:

- a) Atingida a estabilização da temperatura, aplicou-se a pasta lubrificante ROYAL COAT 900 com espátula na superfície da peça a ser roleteada;
- b) Novamente, com corpo de prova em rotação e com as resistências elétricas aproximadas, aqueceu-se a superfície durante um minuto, atingindo novamente a temperatura máxima de 310 °C aproximadamente;
- c) Para o roleteamento da próxima parte do corpo de prova, onde se aplicou outra condição de roleteamento, não houve a necessidade de aquecimento preliminar, uma vez que toda superfície do corpo de prova já tinha sido aquecida.

A Tabela 10 traz as condições finais dos ensaios conduzidos no trabalho. Essa configuração foi utilizada para os ensaios de roleteamento convencional e roleteamento a quente, diferindo somente a lubrificação entre estes métodos de roleteamento.

Tabela 10 - Configuração dos ensaios finais de roleteamento convencional e a quente.

Ensaio	Rotação da peça (rpm)	Força (N)	Número de passes	Inclinação da ferramenta	Rugosidade ( $\mu\text{m}$ )	Circularidade ( $\mu\text{m}$ )
					Peça torneada	
1	180	850	4	45°	0,60	7,60
2	560	350	4			
3	560	550	4			
4	560	850	1			
5	560	850	2			
6	560	850	3			
7	560	850	4			
8	1400	850	4			

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos roleteamentos convencional e a quente sob as condições determinadas na Tabela 10. Nos itens a seguir são apresentados gráficos e imagens relacionados às variáveis de saída mencionados no capítulo “materiais e Métodos”, ou seja: rugosidade, desvio de circularidade, microdureza, tensão residual e microestrutura.

### 4.1 Rugosidade

A Figura 44 apresenta os resultados de rugosidade obtidos no roleteamento convencional e a quente, após quatro passes, quando é empregada uma força de 850 N e rotação de 560 rpm.

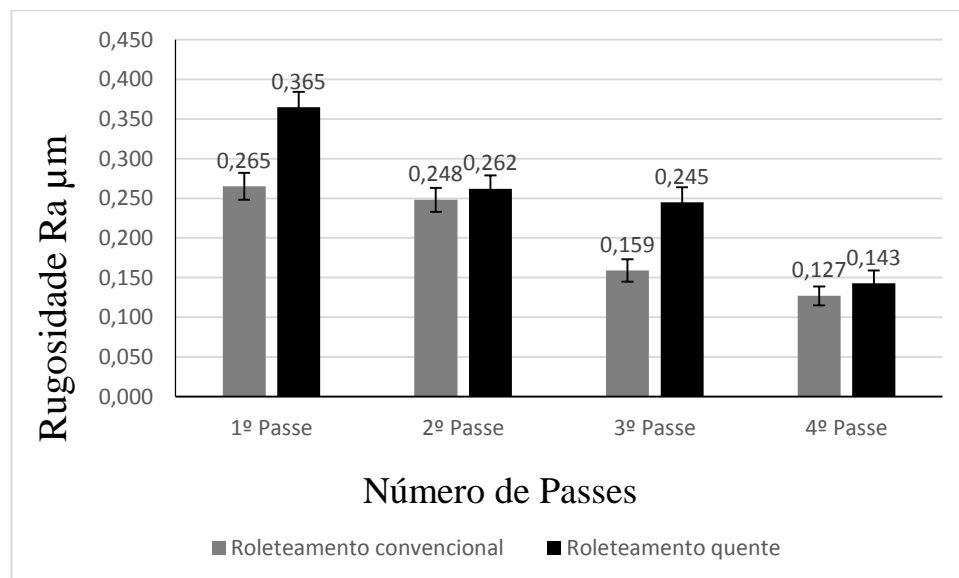


Figura 44 - Influência do número de passes na rugosidade Ra (Força = 850 N; rotação = 560 rpm).

Inicialmente, a peça torneada apresentou uma rugosidade média de  $0,6 \mu\text{m}$  e um desvio de circularidade de  $7,64 \mu\text{m}$ . No entanto, conforme pode ser observado na Figura 44, após o primeiro passe de roleteamento, a rugosidade é diminuída para  $0,265 \mu\text{m}$  e  $0,365 \mu\text{m}$ , aproximadamente, no roleteamento convencional e a quente, respectivamente. Com o progressivo aumento do número de passes, a rugosidade é diminuída até alcançar o valor mínimo de  $0,127 \mu\text{m}$  no roleteamento convencional. O roleteamento a quente também tem sua

rugosidade diminuída, porém, em menor proporção:  $0,143 \mu\text{m}$ . Este comportamento pode ser creditado ao efeito dos passes consecutivos, nos quais o material escoado pôde ser regularizado e encruado, tornando a textura da superfície mais uniforme, com conseqüente melhora no acabamento. Pôde-se observar que o aumento do número de passes foi benéfico para a diminuição da rugosidade, tanto para o roleteamento convencional quanto a quente. A sucessiva passagem da ferramenta sobre a peça resulta em um aumento da homogeneidade na deformação plástica, possibilitando que os picos da superfície, anteriormente torneada, sejam efetivamente escoados para seus vales, diminuindo, assim, cada vez mais a sua rugosidade.

Destaca-se que, para o roleteamento convencional, pôde-se alcançar uma melhora máxima da rugosidade de 90% enquanto que para o roleteamento à quente a melhora máxima foi de 85%, em relação à peça inicial torneada.

A Figura 45 apresenta os valores de rugosidade média aritmética (Ra) dos corpos de prova obtidos após o quarto passe de roleteamento, tanto no processo convencional quanto a quente, sob diferentes rotações da peça (180, 560 e 1400 rpm) quando empregada uma força de roleteamento constante de 850N.

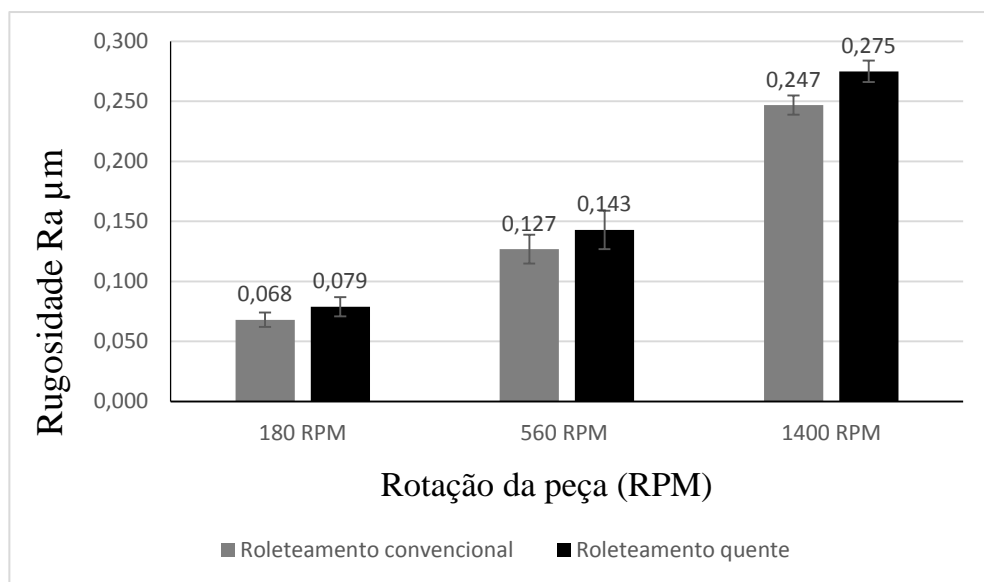


Figura 45 - Influência da rotação da peça na rugosidade Ra ( $F = 850 \text{ N}$ ; número de passes = 4).

Na Figura 45, analisando-se os resultados obtidos, pode-se inferir que o roleteamento com a menor rotação da peça leva a um tempo de operação maior fazendo com que o material escoado seja exposto ao calor por mais tempo e, portanto, mais suscetível à deformação plástica e regularização da textura. A deformação plástica causada pelo roleteamento aquecido foi moderada, particamente no mesmo nível do roleteamento convencional, causando apenas um

leve aumento de rugosidade em relação a este último. Uma rotação maior, de 560 rpm, fez com que houvesse um menor tempo de operação e, por isso, uma menor exposição do material deformado ao calor, fazendo com que o material sofresse um menor escoamento, por isso sendo menos regularizado. No caso da maior rotação, a aplicação da pasta lubrificante mostrou-se pouco eficiente, uma vez que se despreendeu da superfície da peça com a alta velocidade. Como consequência, a rugosidade do roleteamento a quente se mostrou maior em relação ao roleteamento convencional.

O fato da maior velocidade de passagem da ferramenta sobre a peça e ineficiência da lubrificação na condição aquecida promoveu um contato entre o par ferramenta-peça mais extremo, favorecendo a ocorrência de riscos e descamações, conforme indicam as setas no corpo de prova mostrado na Figura 46.

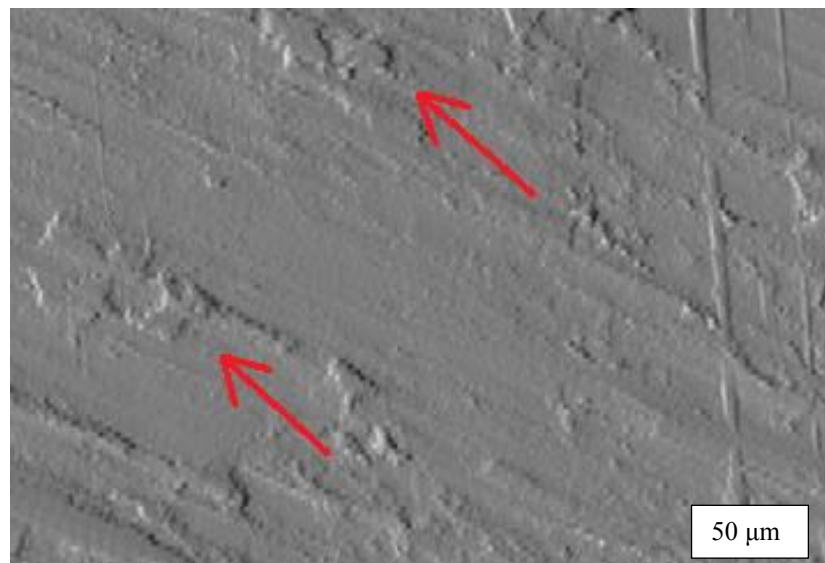


Figura 46 - Descamação superficial no roleteamento aquecido sob 1400 rpm.

A Figura 47 mostra o comportamento da rugosidade após o quarto passe de roleteamento convencional e a quente para diferentes forças e sob uma rotação de 560 rpm. Para ambos os processos, convencional e a quente, a rugosidade apresenta um valor que diminui de acordo com o aumento da força de roleteamento aplicada. Isso ocorre pelo fato de que uma maior força proporciona um maior escoamento plástico e, conseqüentemente, um preenchimento mais completo do material dos picos para os vales, regularizando mais efetivamente a superfície e melhorando seu acabamento superficial.

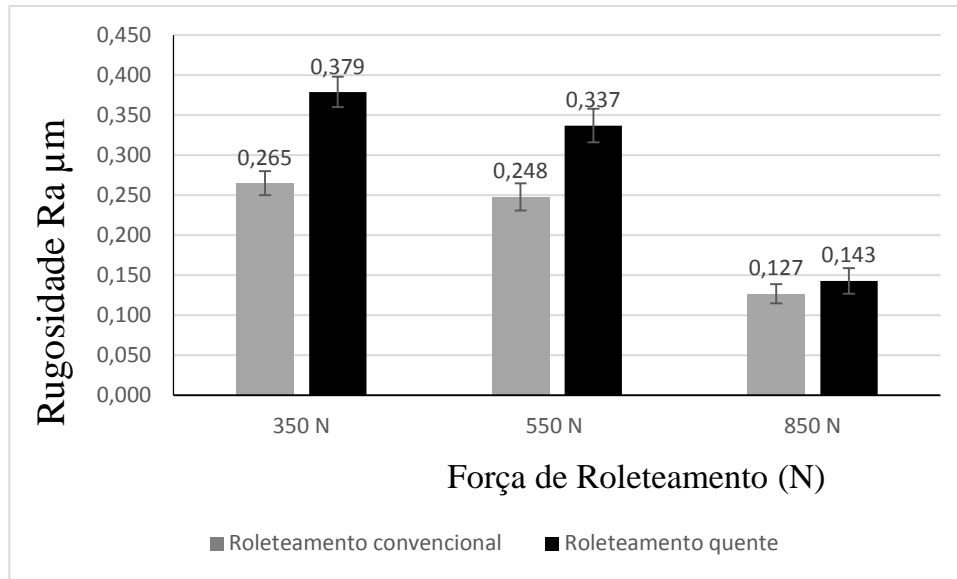


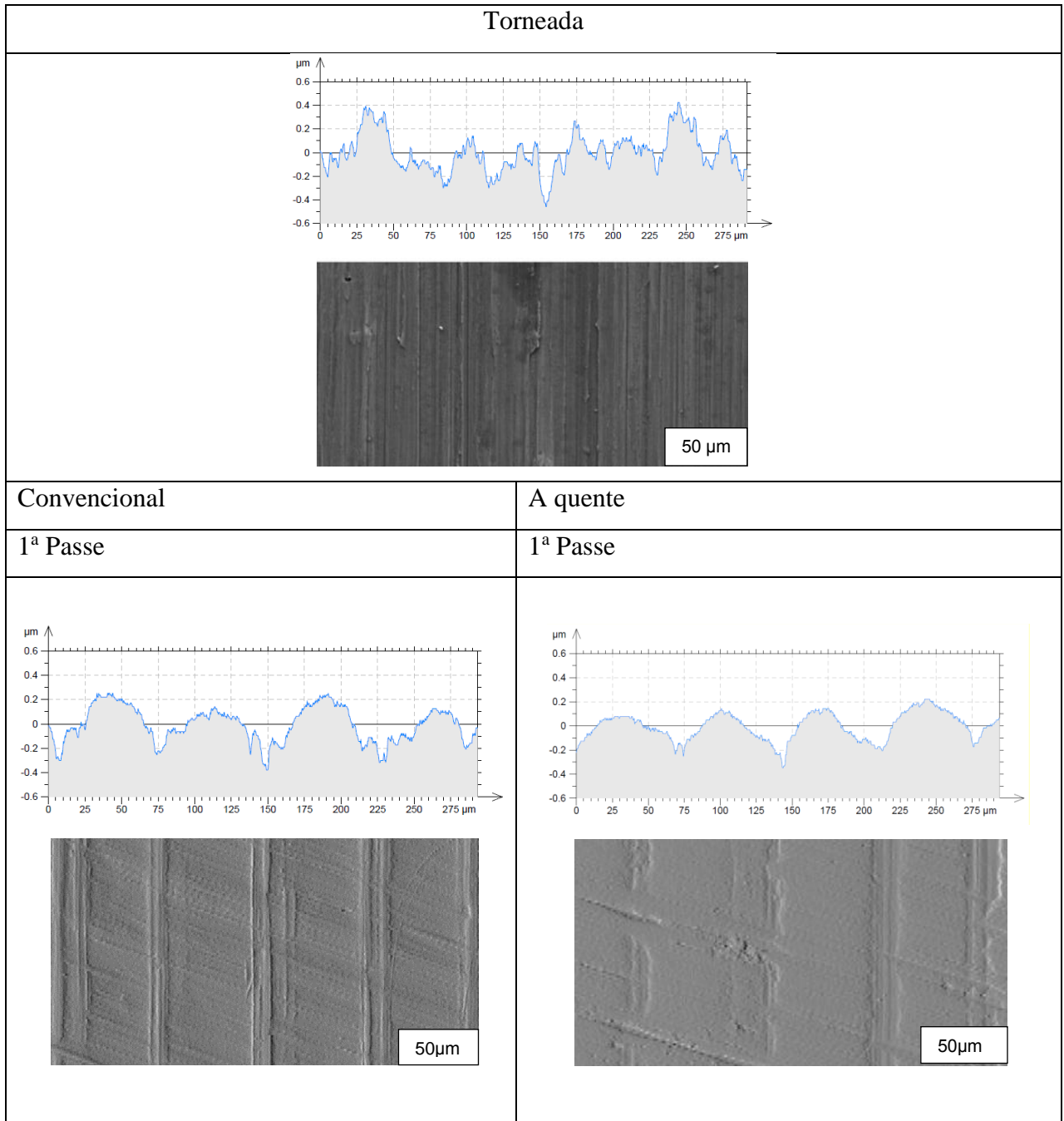
Figura 47 - Influência da força de roleteamento na rugosidade Ra (Número de passes = 4; rotação = 560 rpm).

Em geral, estes resultados podem ser atribuídos à manutenção do nível de escoamento já verificado para a menor força na condição a quente. Para a maior força, tem-se um preenchimento ainda mais completo dos vales e maior uniformização da textura superficial, refletindo numa diminuição do valor da rugosidade no roleteamento convencional. Com o emprego do aquecimento, continua havendo escoamento para além do preenchimento dos vales, não permitindo que a rugosidade abaixe.

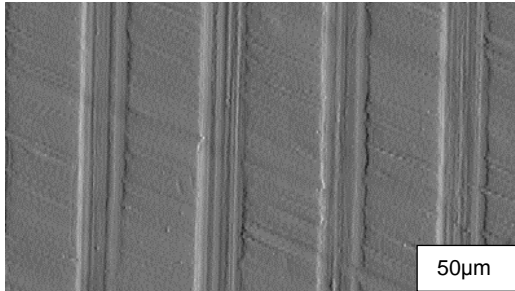
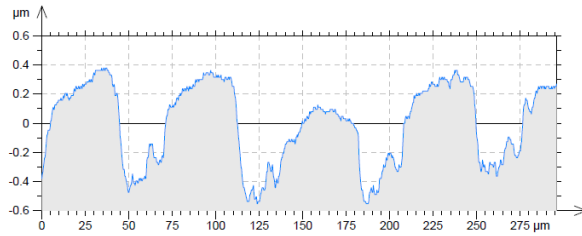
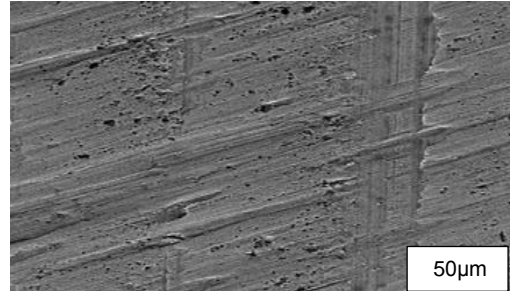
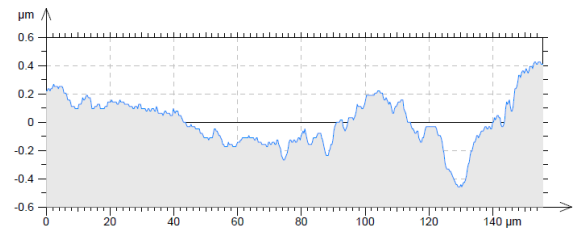
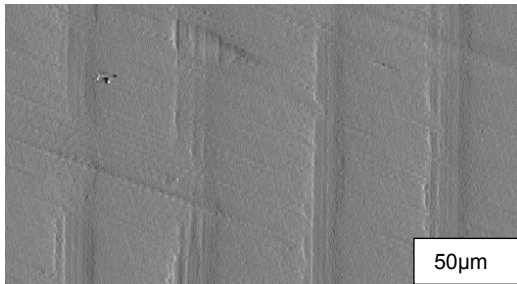
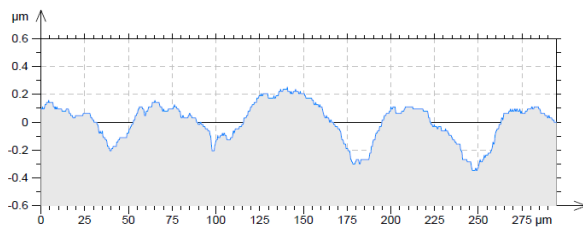
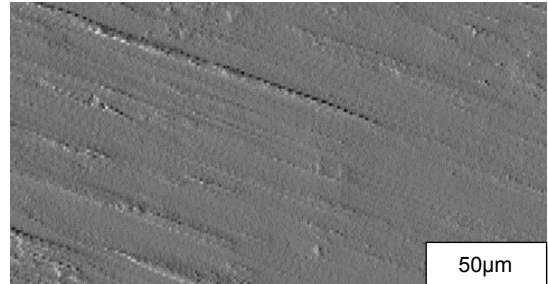
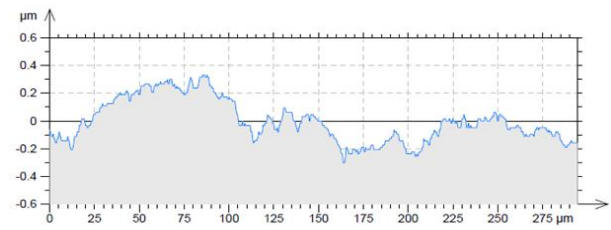
#### 4.2 Perfil de rugosidade

Para uma visualização do efeito do roleteamento na superfície do corpo de prova, utilizou-se os perfis de rugosidade gerados pelo perfilômetro durante as medições. O conjunto de ilustrações da Figura 48 ilustra o perfil da superfície inicial do corpo de prova torneado e roleteado, tanto convencional quanto a quente quando se empregou a força de 850 N e rotação de 560 rpm. No caso do corpo de prova torneado, os picos e vales se mostram pronunciados, ao contrário do processo de roleteamento, que produz ondulações com características mais definidas e alturas entre picos e vales menores. A medida que os passes de roleteamento transcorrem, os valores médios entre pico e vale diminuem, especialmente nos dois últimos passes. No caso do roleteamento a quente o passo entre as ondulações parecem aumentar indicando um maior escoamento superficial provocado pela passagem da ferramenta, embora

isto não tenha relação direta com os valores da rugosidade média aritmética, que no seu cálculo envolve os valores das áreas do perfil. Essas considerações são corroboradas pelas imagens da superfície dos corpos de prova que sugerem um maior escamento do material produzido pelo roleteamento a quente.





2<sup>a</sup> Passe2<sup>a</sup> Passe3<sup>a</sup> Passe3<sup>a</sup> Passe

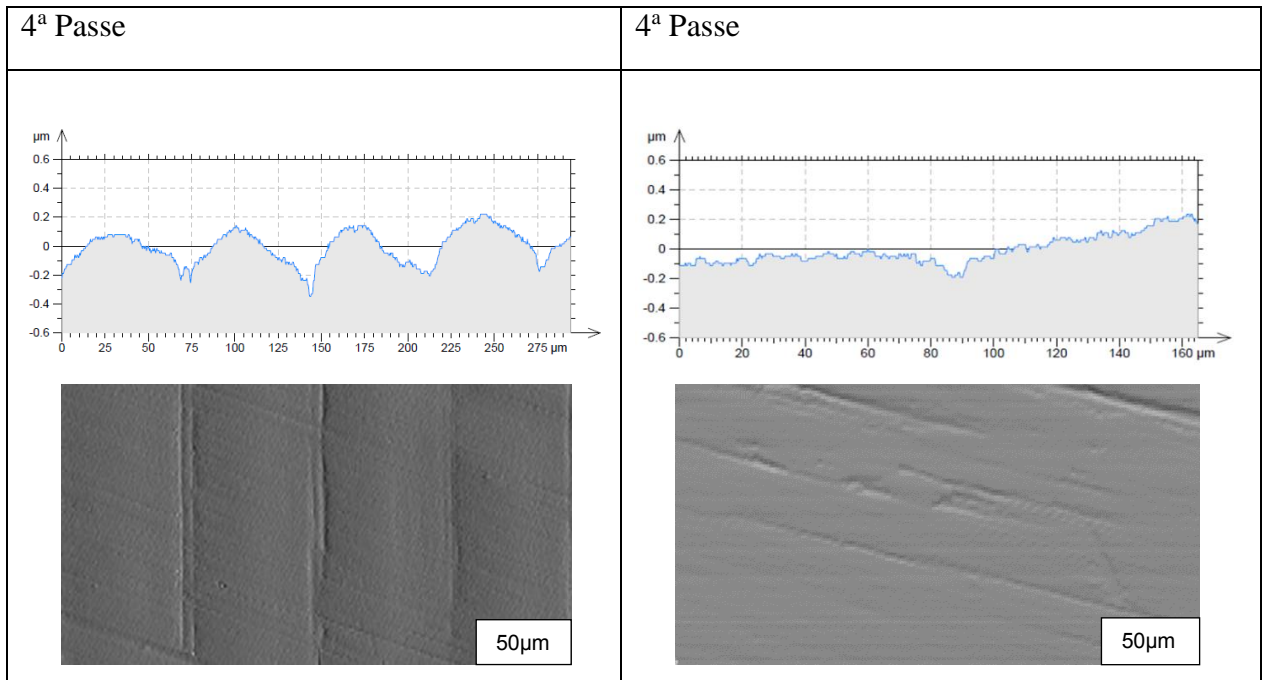


Figura 48 - Perfil de rugosidade de os passes de roleteamento convencional e aquecido.

### 4.3 Circularidade

A Figura 49 mostra a influência do número de passes no desvio de circularidade do corpo de prova quando submetido ao roleteamento convencional e a quente sob uma força de roleteamento de 850 N e rotação de 560 rpm. Na condição a quente, o menor desvio de circularidade é obtido no 4º passe com diminuição progressiva do desvio a medida que se aumenta o número de passes. Pelo fato da peça sofrer aquecimento, há um abaixamento da tensão limite de escoamento do material, facilitando a deformação plástica do material e, com isso, permitindo uma correção de forma. No entanto, no roleteamento convencional, tem-se um efeito oposto, com o aumento do desvio de circularidade a medida que se aumenta o número de passes. O roleteamento convencional, no 1º passe, apresentou menores desvios que no 2º passe, mas com uma diferença relativamente pequena. Com o 3º passe, observa-se um aumento acentuado no desvio de circularidade com o aumento de passes. Isso pode ser creditado ao fato do material ter sua microdureza aumentada cada vez mais por causa do aumento sucessivo do encruamento com os passes sofridos. Desta forma, ao contrário do material aquecido, que é capaz de escoar sob os passes sofridos, o material não aquecido e encruado não é capaz de transformar a força de roleteamento em deformação plástica, mas sim em deformação elástica da peça sendo deslocada de seu eixo original produzindo desvio de forma.

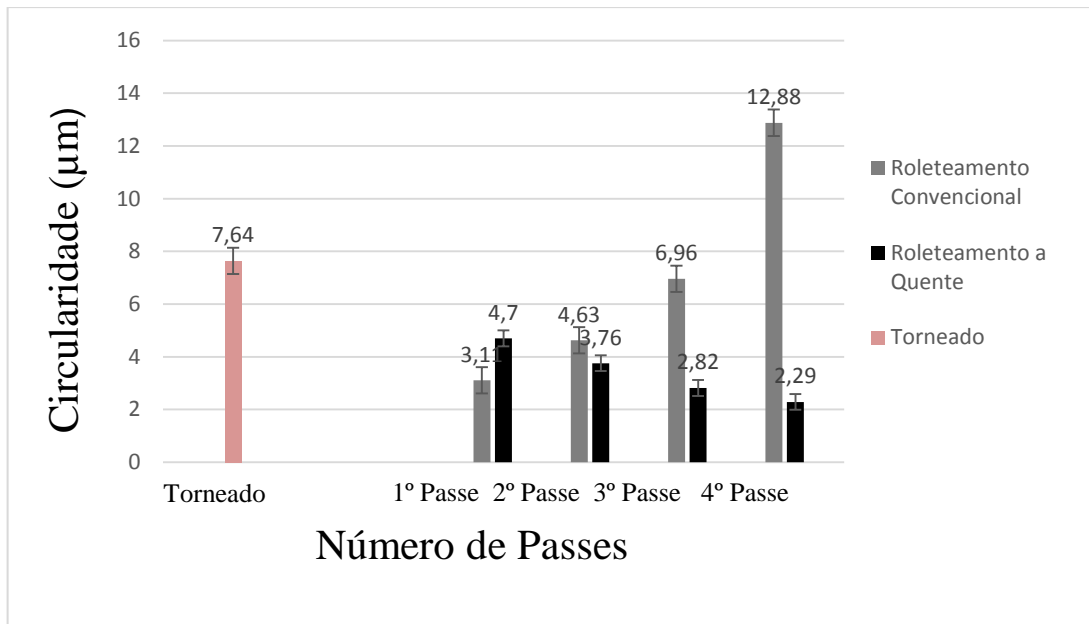


Figura 49 - Influência do número de passes no desvio de circularidade (Força = 850 N; rotação = 560 rpm).

A Figura 50 mostra a influência da rotação da peça no desvio de circularidade ao final do quarto passe de roletamento quando empregado uma força de 850N. Nota-se que no roletamento a quente, em todas as rotações, foi possível obter menor desvio de circularidade em relação a peça torneada, com uma redução de 70%. Já o processo convencional teve um comportamento contrário: o desvio de circularidade aumentou em relação à peça torneada. Este resultado indesejável pode ser creditado, novamente, ao aumento da microdureza superficial do material da peça como resultado do processo de roletamento, que não absorve a força por meio de deformação plástica e a peça passa a sofrer deformação elástica se traduzindo em desvio de forma. O fato das maiores rotações produzirem os maiores desvios sugere que a menor permanência da ferramenta em contato com a peça diminui o tempo de relaxamento do conjunto peça/ferramenta e os valores dos desvios, por isso, são maiores.

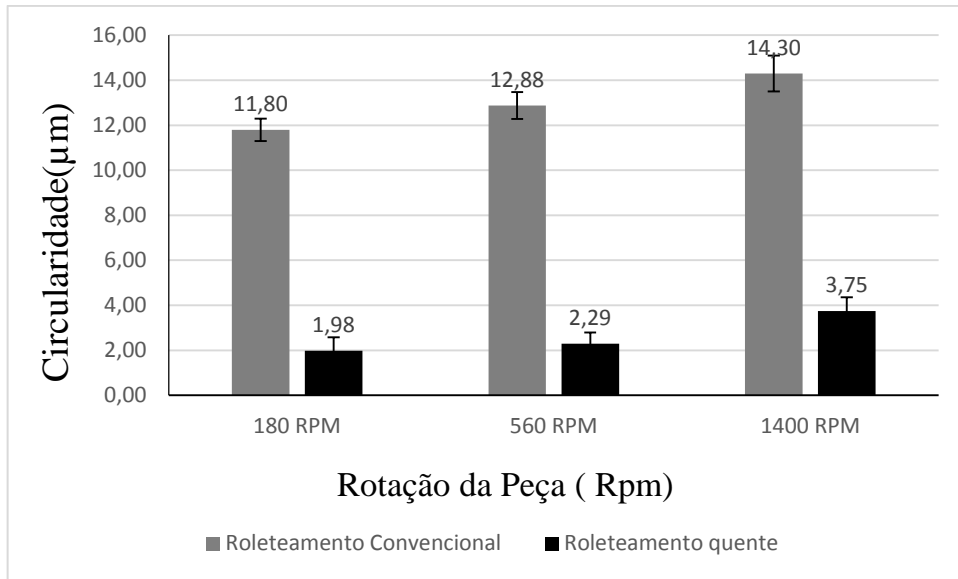


Figura 50 - Influência da rotação no desvio de circularidade ( $F = 850 \text{ N}$ ; número de passes = 4).

A Figura 51 mostra a influência da força de roleteamento no desvio de circularidade, após o quarto passe, quando empregado uma rotação da peça de 560 rpm. Nota-se, pelos resultados que o aumento da força de roleteamento promove uma diminuição do desvio de circularidade no processo a quente, uma vez que ocorre o abaixamento da tensão limite de escoamento do material. Nesta situação, as maiores forças são capazes de promover uma maior regularização da superfície. No caso do roleteamento convencional, se a intensidade da força, cujo valor for capaz de produzir um efeito que vai além da deformação plástica e encruamento do material da superfície, pode provocar deflexões na peça. Ao que indica, as forças de 550 N e 850 N se enquadraram nesta hipótese.

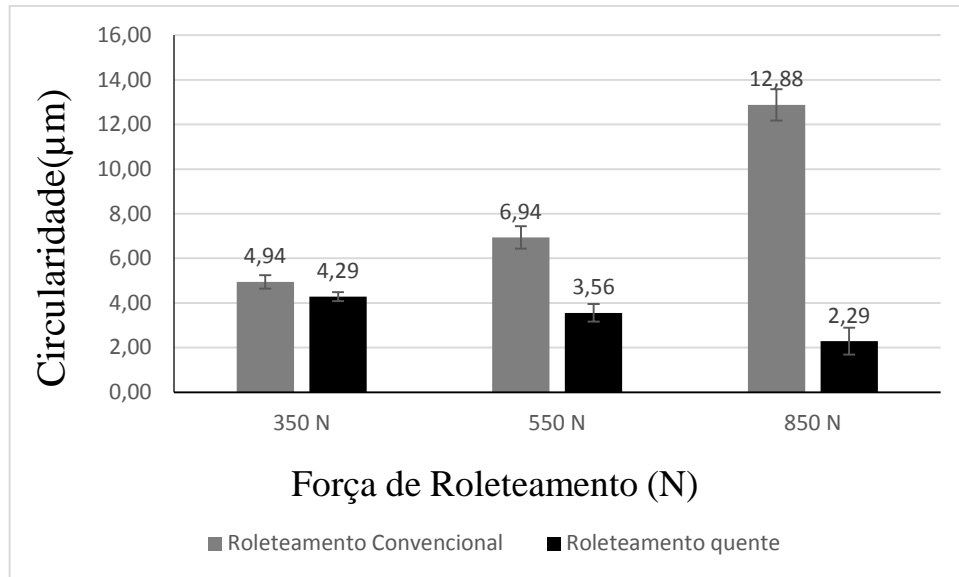


Figura 51 - Influência da força de roleteamento no desvio de circularidade (Número de passes = 4; rotação = 560 rpm).

#### 4.4 Microdureza

As Figuras 52 e 53 mostram os valores de microdureza Vickers medido ao longo da seção do corpo de prova, desde a camada superficial até a profundidade de 350μm após os sucessivos passes de roleteamento, tanto convencional (Figura 52) quanto a quente (Figura 53). A força empregada foi de 850 N sob uma rotação da peça de 180 rpm. Além disso, a microdureza do corpo de prova torneado também foi medida para efeito de comparação com o processo de roleteamento.

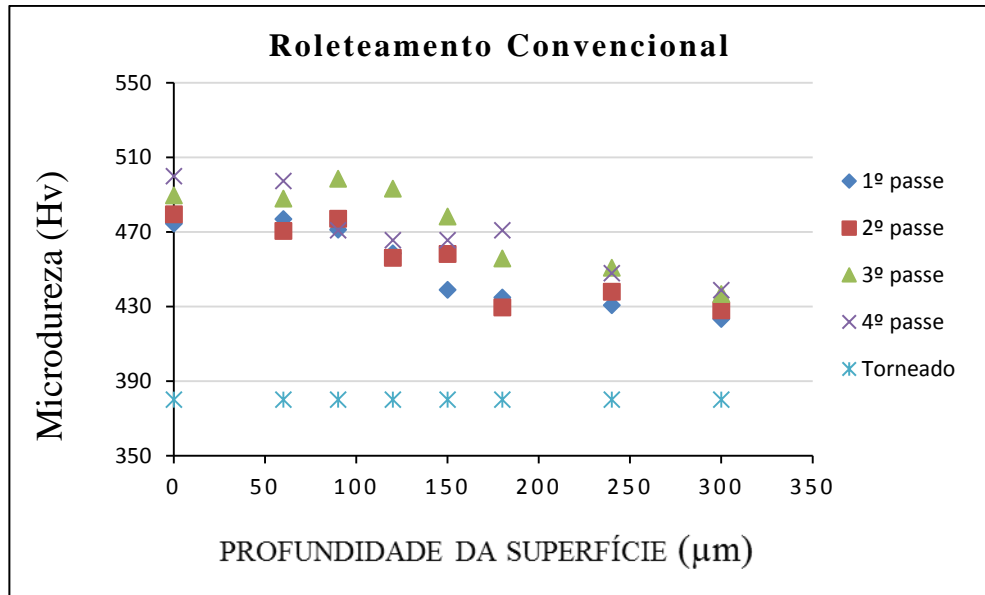


Figura 52 - Roleteamento convencional: microdureza obtidas a cada passe.

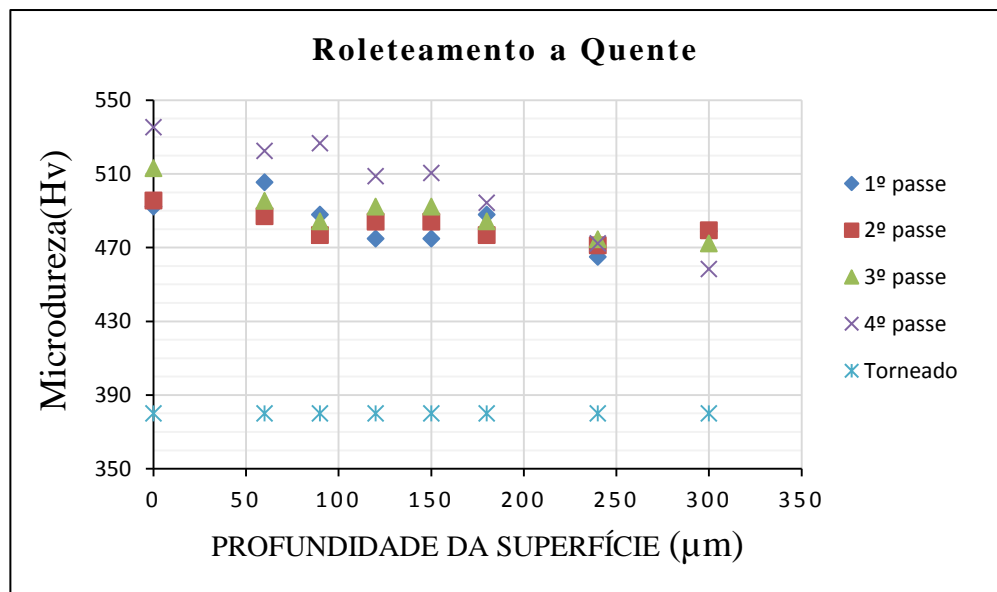


Figura 53 - Roleteamento à quente: microdureza obtida em cada passe.

Conforme pode ser visto na Figura 53, independentemente do número de passes, o roleteamento a quente promoveu maior aumento da microdureza da camada superficial (profundidade=0) e subsuperficial da peça em relação ao roleteamento convencional. Isso porque o aquecimento da peça provoca um abaixamento da tensão limite de escoamento do material tornando a peça mais suscetível ao encruamento e, então, maior microdureza. Fato este que pode ser comparado com a influência da microdureza inicial de uma peça no acréscimo total de microdureza promovido pelo processo de roleteamento. Hassan e Maqableh (2000),

verificaram que quando se tem menor microdureza inicial, maior o acréscimo promovido pelo roleteamento.

Ainda com respeito às Figuras 52 e 53, observa-se que a microdureza cresce com o número de passes, tanto no método convencional quanto a quente, porém, o método a quente consegue produzir valores mais altos. Tal efeito é possível uma vez que o aumento da temperatura é capaz de abaixar a tensão limite de escoamento do material, tornando-o mais susceptível à deformação plástica e, conseqüentemente, ao encruamento o qual, invariavelmente, produz aumento da microdureza.

Interessante observar que a diferença de microdureza entre o quarto passe convencional e a quente permanece significativamente grande mesmo nas camadas com mais profundidades, revelando a destacada capacidade de encruamento do processo a quente. Por outro lado, no caso convencional, tal capacidade vai sendo perdida já no penúltimo passe, quando praticamente não há diferença na microdureza entre o terceiro e quarto passe. Em adição, a profundidade da camada endurecida remanescente da peça roleteada a quente é maior que a do roleteamento convencional.

A microdureza obtida com o processo a quente foi superior ao do processo convencional em todas as profundidades medidas: 7% na menor profundidade; 5% em 0,060 mm; 11% em 0,90 mm; 9% em 0,120 mm; 5% em 0,150 mm; e 5% em 0,300 mm. Considerando a maior profundidade, de 0,300 mm, observa-se que o quarto passe do roleteamento a quente produz uma microdureza de aproximadamente 458 Hv, mesmo valor de microdureza verificado no quarto passe do roleteamento convencional na profundidade de 0,180 mm. Portanto, este valor de microdureza na peça a quente está localizado cerca de 0,120 mm mais profunda que na peça roleteada convencional, ou seja, o roleteamento a quente produz uma camada endurecida mais profunda que na peça roleteada convencional.

#### 4.5 Tensão Residual

Os resultados das tensões residuais analisadas estão apresentados na Figura 54. O sinal negativo (-) significa tensão residual de compressão.

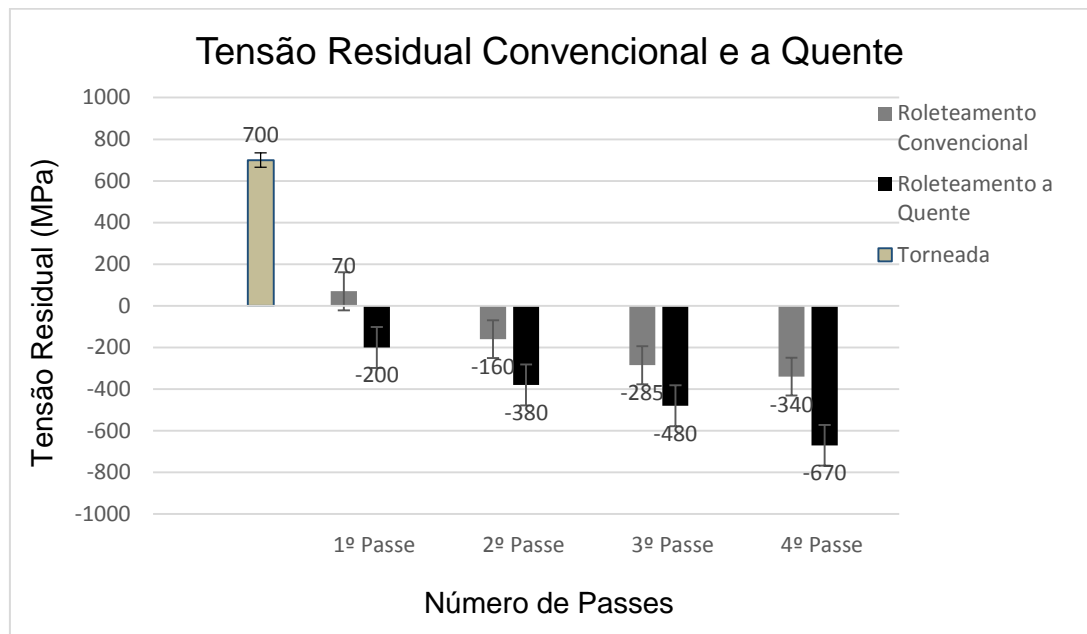


Figura 54 - Tensão residual na superfície do corpo de prova após quatro passes no roleteamento convencional e a quente.

A Figura 54 mostra os valores da tensão residual medida num ponto da superfície da peça após seu torneamento, roleteamento convencional e a quente, em quatro passes sucessivos com uma força de 850 N e 560 rpm. De maneira análoga aos resultados obtidos com a microdureza na seção transversal da peça, a tensão residual também cresce com o aumento do número de passes. Após o torneamento da peça, verifica-se que a tensão residual é de tração e, considerando os demais valores medidos, sua intensidade é a mais elevada. No entanto, logo após o primeiro passe de roleteamento, a tensão é praticamente anulada, mas ainda levemente de tração. A partir do segundo passe, as tensões mudam de natureza, tornando de compressão, e seus valores progressivamente aumentam com o aumento do número de passes. No caso do roleteamento a quente, desde o primeiro passe, as tensões tornam-se de compressão e seus valores também aumentam com o aumento do número de passes, mas com intensidades



significativamente maiores do que no roleteamento convencional, principalmente no quarto passe, de aproximadamente 97% maior.

#### 4.6 Microestrutura

A imagem de microscopia foi feita a fim de encontrar mudanças microestruturais da camada mais superficial entre a peça roleteada e peça torneada.

Como pode-se notar pela Figura 55, na peça que passou pelo processo de roleteamento convencional (Figura 55 a) e a quente (Figura 55 b), utilizando força de 850 N, 4 passes e rotação de 560 RPM, existe uma região sutil de grãos menores e alongados na camada mais próxima da superfície roleteada, a qual foi deformada plasticamente. Diferentemente, a microestrutura da peça torneada, demonstrada na Figura 56, não se nota mudança nos tamanhos de grão em toda a sua extensão.

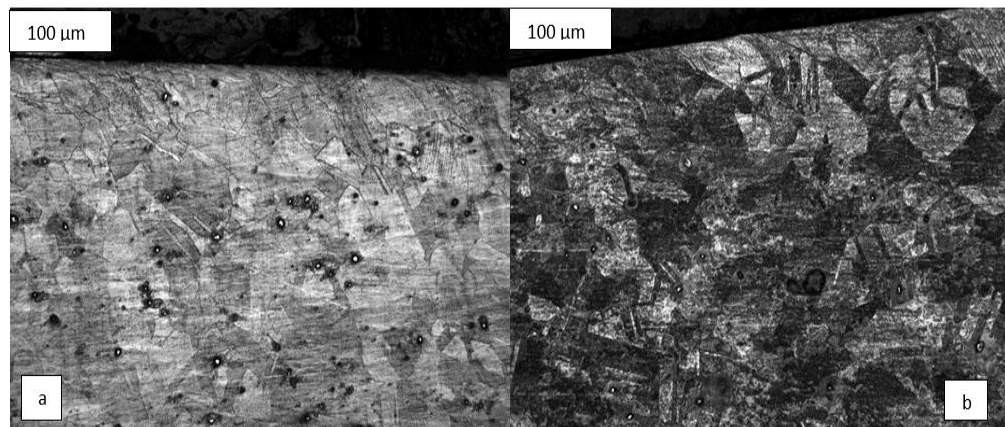


Figura 55 - Microestrutura do corpo de prova sob roleteamento convencional (a) e a quente (b).

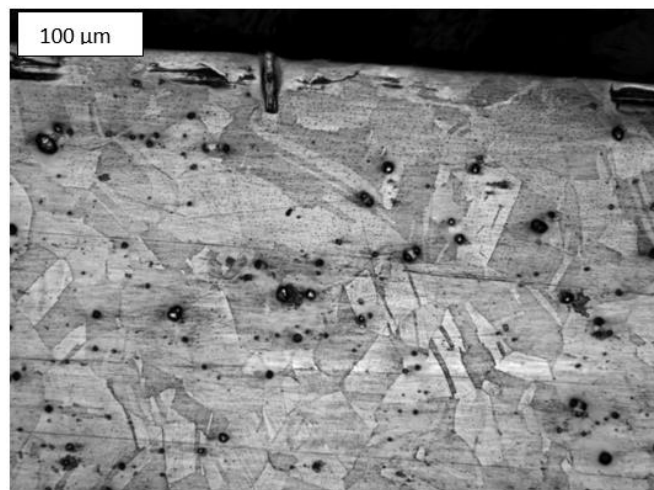


Figura 56 - Microestrutura do corpo de prova torneado.

## CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se objetivamente concluir que:

- A ferramenta de roleteamento feita de material cerâmico se mostrou adequada, suportando as solicitações mecânicas, a qual também deu a possibilidade de inclinação minimizando a área de contato entre peça/ferramenta, sendo o ângulo de 45° aquele que gerou os melhores resultados;
- As resistências elétricas de quartzo empregadas e a conseqüente temperatura por elas geradas na superfície da peça, de aproximadamente 310°C se mostraram capazes de influenciar o processo de roleteamento, mesmo sendo o inonel 718 um material de alta resistência ao calor e de difícil usinagem;
- Observou-se a diminuição da rugosidade com os sucessivos números de passes tanto no roleteamento convencional quanto para o roleteamento a quente. O roleteamento convencional mostrou valores ligeiramente menores do que no roleteamento a quente.
- Em relação a rotação da peça o seu aumento produz maiores valores de rugosidade com acabamento um pouco melhor para o roleteamento convencional.
- No caso da força de roleteamento, maiores valores produzem menores rugosidades, tanto para o roleteamento convencional quanto para o roleteamento a quente. Aqui, a rugosidade produzida pelo roleteamento convencional foi um pouco menor do que no roleteamento a quente. Foi possível notar por meio de perfilometria da superfície dos corpos de prova que os picos no roleteamento a quente foram atenuados em relação ao roleteamento convencional, ainda que a rugosidade média aritmética do roleteamento convencional tenha sido um pouco menor.
- O desvio de circularidade diminuiu com o aumento do número de passes no caso do roleteamento a quente. Ao contrário do desvio de circularidade que aumentou com o número de passes quando empregado o roleteamento convencional.
- Assim como na rugosidade o desvio de circularidade também tem um aumento com crescimento da rotação da peça, no entanto, no roleteamento a quente os valores cresceram modestamente e muito menores do que no roleteamento convencional.
- Quanto a força de roleteamento o aumento da força produziu uma diminuição do desvio de circularidade no caso do roleteamento a quente. Em oposição o desvio de circularidade aumentou no caso roleteamento convencional.

- Pelas imagens da microestrutura realizada na seção transversal dos corpos de prova, na região de sua superfície, existe uma região sutil de grãos menores e alongados na camada mais próxima da superfície no roleteamento convencional e a quente.
- O aumento da rotação em valores indiscriminadamente elevados, por sua vez, não traz benefícios para a circularidade. Notou-se que a rotação de 1400 rpm é demasiadamente alta fazendo com que a ferramenta fique pouco tempo em contato com a peça.
- De um modo geral é possível concluir que o roleteamento é capaz de aumentar consideravelmente a microdureza na superfície e subsuperfície da peça devido ao encruamento produzido pelo processo. Com o aumento do número de passes a microdureza é progressivamente aumentada. O roleteamento a quente introduziu valores aproximadamente 5% mais altos do que no roleteamento convencional em uma camada 35% mais profunda. O roleteamento convencional introduziu uma dureza 25% maior, enquanto que o roleteamento a quente alcançou um aumento de 31%.
- A peça torneada apresenta tensão residual de tração em sua superfície. O primeiro passe de roleteamento convencional ainda introduz tensão de tração, mas seu valor é próximo de zero. Com os demais passes a tensão passa a ser de compressão e seu valor aumenta progressivamente. No entanto, o roleteamento a quente produz tensões de compressão logo no primeiro passe aumentando progressivamente com valores maiores que no roleteamento convencional, chegando a 70% mais elevado no último passe.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Avaliação do desgaste da ferramenta no processo convencional, a quente e torneada.

Utilizar peças torneadas com diferentes rugosidades para fazer o roleteamento.

Análise da resistência mecânica para peças torneadas e roleteadas nos processos convencional e a quente.

Simulação por elementos finitos das modificações na tensão residual da peça pelo processo a quente em relação ao convencional.

Medição da tensão residual por camadas em diferentes profundidades crescentes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6409: Tolerâncias geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento – Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ABNT NBR ISO 4287, Especificações geométricas do produto (GPS) – **Rugosidade: método do perfil – Termos, definições e parâmetros de rugosidade**. ABNT, 2002.

ABRÃO, A. M.; DENKENA, B.; KOEHLER, J.; BREIDENSTEIN, B.; MÖRKE, T. Alterações superficiais e subsuperficiais induzidas no aço alto carbono C60 pela operação de roleteamento. **In: VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2014, Uberlândia. Anais do VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. Rio de Janeiro ABCM, 2014. p. 663.

A. SEQUERA, C. H. FU, Y. B. GUO, and X. T. WEI, “**Surface Integrity of Inconel 718 by Ball Burnishing**,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 23, no. 9, pp. 3347–3353, 2014.

AKKURT, A. Comparison of Roller Burnishing Method with Other Hole Surface Finishing Processes Applied on AISI 304 Austenitic Stainless Steel. **Journal of materials engineering and performance**, v. 20, n. 6, p. 960-968, 2011.

AKKURT, A.; OVALI, İ. Improving the surface topography of mild steel with the burnishing process. **International Journal of Materials Research**, v. 105, n. 10, p. 1004-1016, 2014.

AL-QAWABEHA, U.; EID AL-RAWAJFEH, A.; AL-SHAMAILEH, E. Influence of roller burnishing on surface properties and corrosion resistance in steel. **Anti-Corrosion Methods and Materials**, v. 56, n. 5, p. 261-265, 2009.

ARZT, E.; SINGER, R. F. The effect of grain shape on stress rupture of the oxide dispersion strengthened superalloy INCONEL MA 6000. **Proceedings of the Seven Spring Conference on Superalloys, The Metallurgical Society of AIME**, Warrendale, PA, pp. 367-76, 1984.

AVILÉS, R; ALBIZURI, J.; RODRÍGUEZ, A.; LACALLE, L. L. Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel. **International journal of fatigue**, v. 55, p. 230-244, 2013.

BALLAND, P.; TABOUROT, L.; DEGRE, F.; MOREAU, V. An investigation of the mechanics of roller burnishing through finite element simulation and experiments. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 65, p. 29-36, 2013.

BARROW, G. Use of electric current for hot machining of high strength steels. **Machinery and Production Engineering**, v. 114, p. 370-374, 1969.

CASTRO, C. A. C. Estudo do comportamento à fadiga de metais dentro e fora da água na presença da pressão hidrostática. **Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais**, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2007.

CINDRA FONSECA, M. P. **Evolução do Estado de Tensões Residuais em Juntas Soldadas de Tubulação Durante Ciclos de Fadiga**, Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, 2000.

CHAUDHARI, P.; AWARI, G. K.; KHANDARE, S. S. Investigation of effectiveness of combined turning and burnishing operations performed on lathe machine on an aluminium alloy for the modification of surface texture. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 2, n. 6, p. 1316-1320, 2015.

CHEN, C. H.; SHIOU, F.-J. Determination of optimal ball-burnishing parameters for plastic injection moulding steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 21, n. 3, p. 177-185, 2003.

CHEN, N. N. S; LO, K. C. Factors affecting tool life in hot machining of alloy steels, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 14, p. 161-173, 1974.

CHOMIENNE, V.; VALIORGUE, F.; RECH, J.; VERDU, C. Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 13, p. 90-96, 2016.

COBANOGLU, T.; OZTURK, S. Effect of burnishing parameters on the surface quality and hardness. **Journal of Engineering Manufacture**, v. 9, p. 1-9, 2014.

COBANOGLU, T.; OZTURK, S. Effect of burnishing parameters on the surface quality and hardness. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 229, n. 2, p. 286-294, 2015.

DENKENA, B.; BREIDENSTEIN, B.; DE LEON, L.; DEGE, J. Development of combined manufacturing technologies for high-strength structural components. **Advanced Materials Research**. Trans Tech Publications, v. 137, p. 219-246, 2010.

EL-AXIR, M. H. An investigation into roller burnishing. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 40, n. 11, p. 1603-1617, 2000.

EL-AXIR, M. H. An investigation into the ball burnishing of aluminium alloy 6061-T6. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 221, n. 12, p. 1733-1742, 2007.

EL-KHABEERY, M. M.; EL-AXIR, M. H. Experimental techniques for studying the effects of milling roller-burnishing parameters on surface integrity. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 41, n. 12, p. 1705-1719, 2001.

EL-TAWHEEL, T. A.; EL-AXIR, M. H. Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 41, n. 3-4, p. 301-310, 2009.

EL-TAWHEEL, T. A.; EL-AXIR, M. H. Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 41, n. 3-4, p. 301-310, 2009.

EL-TAYEB, N. S. M.; LOW, K. O.; BREVERN, P. V. Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061. **Journal of materials processing technology**, v. 186, n. 1, p. 272-278, 2007.

FITZPATRICK, M. E.; FRY, A. T., HOLDWAY, P.; KANDIL, F. A.; SACHLETON, J.; SUMOMINEN, L. **Determination of residual stresses by X-ray diffraction**. 2005.

GHARBI, F.; SGHAIER, S.; HAMDI, H.; BENAMEUR, T. Ductility improvement of aluminum 1050A rolled sheet by a newly designed ball burnishing tool device. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 60, n. 1-4, p. 87-99, 2012.

GHODAKE, A. P.; RAKHADE, R. D.; MAHESHWARI, A. S. Effect of Burnishing Process on Behavior of Engineering Materials-A Review. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)**, v. 5, n. 5, p. 09-20, 2013.

GIGGINS, C. S.; PETTIT, F. S. The effect of alloy grain-size and surface deformation on the selective oxidation of chromium in Ni-Cr alloys at temperatures of 900 and 1100o C (Ni-Cr alloys effects of grain size and surface deformation on oxidation properties at high temperature). **METALLURGICAL SOCIETY OF AIME, TRANSACTIONS**, v. 245, p. 2509-2514, 1969.

GRIGOR'YANTS, A. G.; SAFONOV, A. H. Laser technique for surface modification. **Laser Techniques and Technology**, 1989.

HAMADACHE, H.; LAOUAR, L.; ZEGHIB, N. E.; CHAOUI, K. Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 180, n. 1, p. 130-136, 2006.

HASSAN, A. M.; AL-BSHARAT, A. S. Influence of burnishing process on surface roughness, hardness, and microstructure of some non-ferrous metals. **Wear**, v. 199, n.1, p. 1- 8, 1996.

HASSAN, A. M.; MAQABLEH, A. M. The effects of initial burnishing parameters on non ferrous components. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 102, n. 1, p. 115-121, 2000.

HASSAN, A. M.; MOMANI, A. MS. Further improvements in some properties of shot peened components using the burnishing process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 40, n. 12, p. 1775-1786, 2000.

HUUKI, J.; LAAKSO, S. VA. Integrity of surfaces finished with ultrasonic burnishing. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 227, n. 1, p. 45-53, 2013.

KITAGAWA, T.; KATSUHIRO, K; KUBO, A. Plasma hot machining for high hardness metals. **Bulletin Japan Society of Precision Engineering**, v. 22, n. 2, p. 145-151, 1988.

KÖNIG, W.; CRONJÄGER, L.; SPUR, G.; TÖNSHOFF, H. K.; VIGNEAU, M.; ZDEBLICK, W. J. Machining of New Materials. **Annals of the CIRP**, v. 39, n, 2, p. 673-681, 1990.

LOH, N. H.; TAM, S. C.; MIYAZAWA, S. A study of the effects of ball-burnishing parameters on surface roughness using factorial design. **Journal of Mechanical Working Technology**, v. 18, n. 1, p. 53-61, 1989.



MALLESWARA, R. J. N.; REDDY, A. C. K. ;RAO, P. V. R. The effect of roller burnishing on surface hardness and surface roughness on mild steel specimens. **International Journal Of Applied Engineering Research, Dindigul**, v. 1, n. 4, p. 777-785, 2011.

MORIMOTO, T. Work hardening and tool surface damage in burnishing. **Wear**, v. 127, n. 2, p. 149-159, 1988.

MURTHY, R. L.; KOTIVEERACHARI, B. Burnishing of metallic surfaces—a review. **Precision Engineering**, v. 3, n. 3, p. 172-179, 1981.

NAZMY, M.; RYDSTAD, H. Process for increasing the oxidation resistance and corrosion resistance of a component made of a dispersion strengthened superalloy by a surface treatment. **U.S. Patent** n. 4,909,859, 20 mar. 1990.

NEAGU-VENTZEL, S. A theoretical and experimental study of single roll burnishing process as applied to yokes. **Dissertation, University of Toledo**, 2001.

OKADA, M.; SUENOBU, S.; WATANABE, K.; YAMASHITA, Y.; ASAKAWA, N. Development and burnishing characteristics of roller burnishing method with rolling and sliding effects. **Mechatronics**, v. 29, p. 110-118, 2015.

OKOSHI, M.; UYEHARA, K. Hot machining by electric current. **Proceedings of the International Production Research Conference**, p. 264-271, 1963.

ÖZLER, L.; INAN, A.; ÖZEL, C. Theoretical and experimental determination of tool life in hot machining of austenitic manganese steel. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 41, p. 163-172, 2001.

PATEL, K. A.; BRAHMBHATT, P. K. A Comparative Study of the RSM and ANN Models for Predicting Surface Roughness in Roller Burnishing. **Procedia Technology**, v. 23, p. 391-397, 2016.

PREVÉY, P.; TELESMAN, J.; GABB, T.; KANTZOS, P. FOD resistance and fatigue crack arrest in low plasticity burnished IN718. In: **Proceedings of the 5th Nat. Turbine Eng. HCF Conference**. 2000.

PU, Z.; SONG, G. L.; YANG, S.; OUTEIRO, J. C.; DILLON, O. W.; PULEO, D. A.; JAWAHIR, I. S. Grain refined and basal textured surface produced by burnishing for 60

improved corrosion performance of AZ31B Mg alloy. **Corrosion Science**, v. 57, p. 192-201, 2012.

RAJESHAM, S.; TAK, J. C. A study on the surface characteristics of burnished components. **Journal of mechanical working technology**, v. 20, p. 129-138, 1989.

RAO, J. M.; REDDY, A. C. K.; RAO, P. R. Experimental investigation of the influence of burnishing tool passes on surface roughness and hardness of brass specimens. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 4, n. 9, p. 1113-1118, 2011.

RODRÍGUEZ, A.; de LACALLE, L. L.; CELAYA, A.; LAMINIZ, A.; ALBIZURI, J. Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique. **Surface and Coatings Technology**, v. 206, n. 11, p. 2817-2824, 2012.

SAÏ, W. B.; LEBRUN, J. L. Influence of finishing by burnishing on surface characteristics. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 12, n. 1 p. 37-40, 2003.

SALEM, B. W.; MELHAOUI, A.; COHEN, P.; AHDAD, F.; LONGUEMARD, J. P. Laser-assisted machining. **Mecanique Industrielle et matériaux**, v. 48, Iss. 1, p 29-30, 1995.

SANCHEZ, L. E. A.; MELLO, H. J.; NETO, R. R. I.; DAVIM, J. P.; Hot turning of a difficult-to-machine steel (saexev-f) aided by infrared radiation. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 73, n. 5-8, p. 887-898, 2014.

SCHULZE, V. **Modern mechanical surface treatment: states, stability, effects**. John Wiley & Sons, 2006.

SOUZA, D. A. Determinação de tensões residuais em materiais metálicos por meio de ensaio de dureza. **Dissertação, Universidade Federal de São João Del-Rei**, 2012.

SUNDER, R. Fatigue as a process of cyclic brittle microfracture. **Fatigue & fracture of engineering materials & structures**, v. 28, n. 3, p. 289-300, 2005.

TIAN, Y. ; SHIN, Y. C. Laser-assisted burnishing of metals. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 1, p. 14-22, 2007.

TOTTEN, George E. (Ed.). **Handbook of residual stress and deformation of steel**. ASM international, 2002.

TRAVIESO-RODRIGUEZ, J. A.; GÓMEZ-GRAS, G.; DESSEIN, G.; CARRILLO, F.; ALEXIS, J.; JORBA-PEIRO, J.; AUBAZAC, N. Effects of a ball-burnishing process assisted by vibrations in G10380 steel specimens. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 81, n. 9-12, p. 1757-1765, 2015.

ULUTAN, D.; ALACA, B. E.; LAZOGLU, I. Analytical modelling of residual stresses in machining. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 183, n. 1, p. 77-87, 2007.

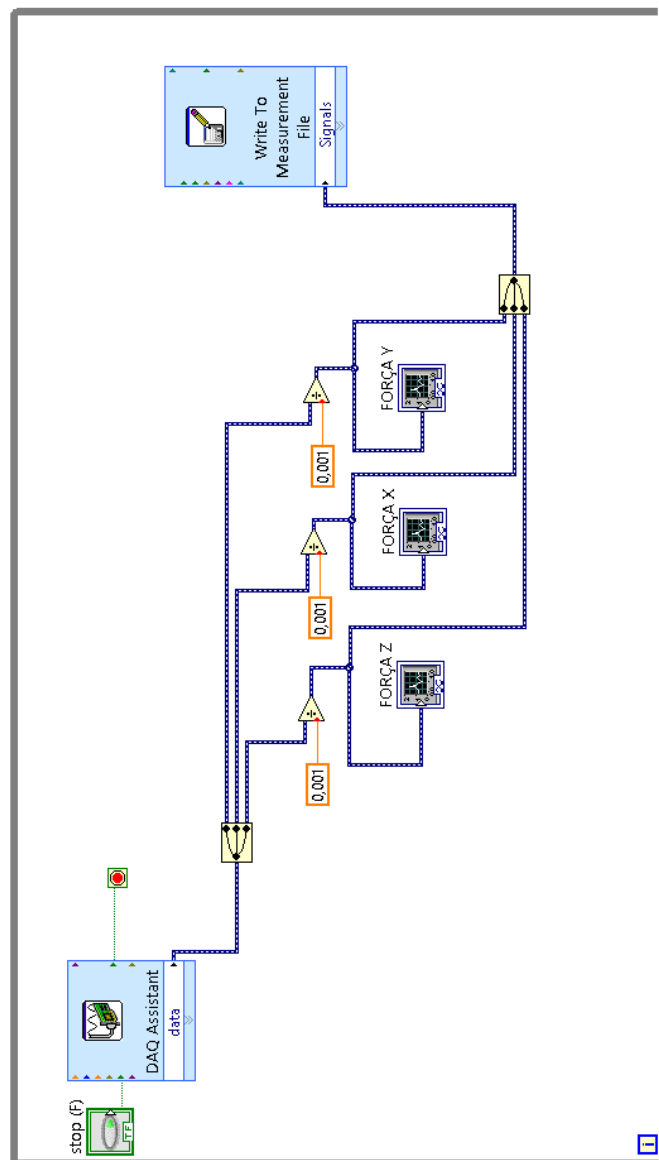
VILLARES METALS. **Specialty alloys**. Villares Metals, 2008. 8p.

YELDOSE, B. C.; RAMAMOORTHY, B. An investigation into the high performance of TiN-coated rollers in burnishing process. **Journal of materials processing technology**, v. 207, n. 1, p. 350-355, 2008.

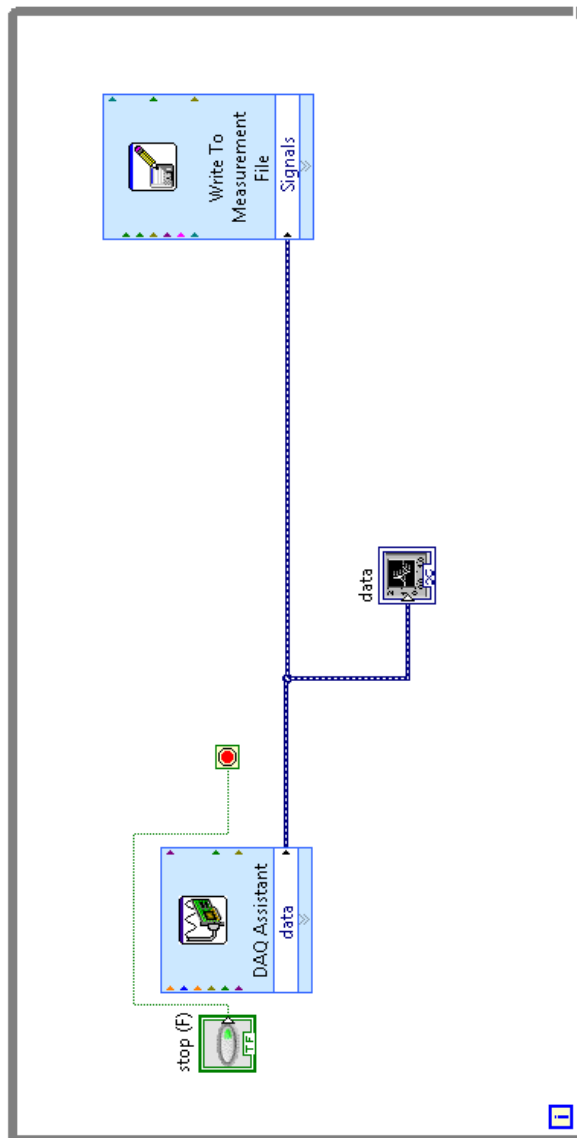
ZHANG, P.; LINDEMANN, J. Effect of roller burnishing on the high cycle fatigue performance of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80. **Scripta materialia**, v. 52, n. 10, p. 1011-1015, 2005.

ZHANG, T.; BUGTAI, N.; MARINESCU, I. D. Burnishing of aerospace alloy: A theoretical–experimental approach. **Journal of Manufacturing Systems**, 2014.

## ANEXO I

Figura 57 - Diagrama em *LabView* para aquisição dos dados de força.

## ANEXO II

Figura 58 - Diagrama em *LabView* para aquisição dos dados de temperatura.