



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

INFLUÊNCIA DO TEOR DE CARBONO SOBRE A
INTEGRIDADE SUPERFICIAL DE AÇOS SUBMETIDOS À
OPERAÇÃO DE ROLETEAMENTO

FILIPE FIGUEIREDO DOS SANTOS

Belo Horizonte, 15 de março de 2019

Filipe Figueiredo dos Santos

**INFLUÊNCIA DO TEOR DE CARBONO SOBRE A
INTEGRIDADE SUPERFICIAL DE AÇOS SUBMETIDOS À
OPERAÇÃO DE ROLETEAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de Manufatura e Materiais

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Mendes Abrão

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2019

S237i

Santos, Filipe Figueiredo dos.

Influência do teor de carbono sobre a integridade superficial de aços submetidos à operação de roleteamento [manuscrito] / Filipe Figueiredo dos Santos. – 2019.

135 f., enc.: il.

Orientador: Alexandre Mendes Abrão.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f.130 - 135.

Bibliografia: f.17 - 52.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Ciência dos materiais - Teses.
3. Aspereza de superfície – Teses. 4. Aço-carbono – Teses.
5. Roleteamento – Teses. I. Abrão, Alexandre Mendes. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA
Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG
Tel.: +55 31 3409.5145
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**"INFLUÊNCIA DO TEOR DE CARBONO SOBRE A INTEGRIDADE
SUPERFICIAL DE AÇOS SUBMETIDOS À OPERAÇÃO DE
ROLETEAMENTO"**

FILIPE FIGUEIREDO DOS SANTOS

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**ENGENHARIA DE MANUFATURA E MATERIAIS**".

Dissertação aprovada no dia 15 de março de 2019.

Por:

Prof. Alexandre Mendes Abrao
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

Prof. Haroldo Beria Campos
Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

Prof. Roberto Braga Figueiredo
Departamento de Engenharia de Materiais e Construção Civil/ UFMG

Dedico este trabalho à minha namorada Vanessa Alves Santana.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), por permitir o desenvolvimento deste trabalho. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e também por intermédio do programa BRAGECRIM - Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura (projeto 029/14).

Ao meu orientador e professor Alexandre Mendes Abrão, por compartilhar tanto conhecimento e experiência e pela paciência, esforço e dedicação durante todo o trabalho.

Aos professores Marcelo Araújo Câmara e Paulo César de Matos Rodrigues do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG e aos colegas do Laboratório de Usinagem e Automação, especialmente, Anderson Júnior dos Santos, Augusto Moura Martins, Carlos Artur Alevato Leal e Bruno Dorneles de Castro, pelo auxílio na operação das máquinas, realização dos ensaios e em diversas outras atividades.

À professora Geralda Cristina Durães de Godoy do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG por disponibilizar o Laboratório de Tribologia e Corrosão de Materiais.

Aos professores Sandro da Costa Silva do Departamento de Engenharia Mecânica e Elaine Carballo Siqueira Corrêa do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), por disponibilizarem o Laboratório de Materiais, Tribologia e Superfícies e o Laboratório de Tratamentos Térmicos, respectivamente, e pela orientação nas atividades lá desenvolvidas.

Ao Centro de Microscopia da UFMG por fornecer o equipamento e o suporte do técnico para os experimentos que envolveram microscopia eletrônica e ao técnico Marcelo da Cruz Costa de Souza pela assistência técnica durante esses experimentos.

Aos meus pais Sebastião Geraldo dos Santos e Janice Mendes Figueiredo dos Santos e ao meu irmão Caio Figueiredo dos Santos, pelo amor, paciência e apoio de sempre.

À minha namorada Vanessa Alves Santana, pelo amor e paciência, por estar comigo em todos os bons e maus momentos e pelo enorme apoio e incentivo sem o qual este trabalho não seria possível.

Meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	11
RESUMO	13
1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivo geral	16
1.1.1 Objetivos específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Roleteamento	18
2.1.1 Mecânica do roleteamento.....	19
2.2 Integridade superficial	21
2.2.1 Acabamento superficial	25
2.2.1.1 Rugosidade	25
2.2.2 Camada subsuperficial.....	32
2.2.2.1 Deformação plástica	33
2.2.2.2 Alterações metalúrgicas.....	39
2.2.2.3 Variação de dureza	43
2.3 Fadiga e tensões residuais.....	48
3 METODOLOGIA.....	53
3.1 Materiais	54
3.2 Equipamentos	57
3.3 Métodos	58
3.3.1 Tratamento térmico	58
3.3.2 Usinagem dos corpos de prova.....	59
3.3.3 Ensaio de tração.....	59
3.3.4 Roleteamento	60
3.3.5 Medição da rugosidade superficial	64
3.3.6 Microdureza superficial	65
3.3.7 Análise metalográfica.....	66
3.3.8 Microdureza da camada subsuperficial	68
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.1 Ensaio de tração.....	70

4.2	Rugosidade superficial	72
4.2.1	Parâmetros de amplitude	72
4.2.1.1	Médias das ordenadas	72
4.2.1.2	Picos e vales.....	79
4.2.2	Parâmetros da curva da razão portante do perfil	85
4.3	Microdureza.....	93
4.3.1	Microdureza superficial.....	93
4.3.2	Perfil de microdureza abaixo da superfície	97
4.4	Análise microestrutural.....	106
4.4.1	Influência dos parâmetros de roleteamento.....	107
5	CONCLUSÕES.....	119
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	122
	ABSTRACT	123
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
	ANEXO A	130
A.1	Análise química do aço ABNT 1020.....	130
A.2	Análise química do aço ABNT 1065.....	132
A.3	Análise química do aço ABNT 1080.....	134

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Parâmetros de roleteamento, velocidade: (V), avanço (f) e força (F), e seus efeitos usuais sobre a microestrutura e os perfis de tensão residual e de dureza e sobre a rugosidade superficial de aços.....	20
FIGURA 2.2 - Princípio de funcionamento e componentes básicos de um sistema de roleteamento hidrostático.	21
FIGURA 2.3 - Aspectos da integridade superficial mais afetados por tratamentos mecânicos superficiais.....	23
FIGURA 2.4 - Efeito da pressão (P) e do número de passes (n) de roleteamento sobre a profundidade máxima do vale do perfil (Rv), a altura máxima do pico do perfil (Rp) e a altura total do perfil (Rt).	26
FIGURA 2.5 - Efeito da pressão (P) e do avanço (f) de roleteamento sobre o desvio médio aritmético (Ra) da superfície roleteada após um torneamento prévio com ferramenta de raio de ponta igual a 0,4 mm e avanço de corte de 0,08 mm/rev.	27
FIGURA 2.6 - Superfícies dos corpos de prova de UNS S32550 após a usinagem (a) e após o roleteamento com a força de 70 N (b) e 160 N (c).	29
FIGURA 2.7 - Superfícies de aço DIN 20Cr4 roleteadas a seco com força, avanço e velocidade iguais a 200 N, 0,04 mm/rev e 10 m/min, respectivamente, e com quatro passes (a) e oito passes (b).	31
FIGURA 2.8 - Superfícies de aço DIN 20Cr4 roleteadas a seco com um passe, avanço e velocidade iguais 0,04 mm/rev e 10 m/min, respectivamente, e forças de 400 N (a) e 600 N (b).	31
FIGURA 2.9 - Influência da velocidade e do número de passes (a) e da pressão (b) sobre o desvio médio aritmético (Ra) e a altura máxima do perfil (Rz) de superfícies de aço AISI 1045 roleteadas.	32
FIGURA 2.10 - Efeito da pressão (P) e do número de passes (n) de roleteamento sobre a microestrutura da camada subsuperficial de corpos de prova de aço AISI 1060 plenamente recozidos.	34
FIGURA 2.11 - Microestrutura do aço AISI D3 após o torneamento (a) e após o roleteamento lubrificado (b) com velocidade de 1,5 m/s, profundidade de penetração de 0,5 mm, esfera de 20 mm por 60 s.	36

FIGURA 2.12 - Microestrutura da camada subsuperficial de amostras de aço AISI 1010 em três condições diferentes: não roleteada (a), roleteada com força de 500 N, velocidade de 70 m/min e avanço de 0,18 mm/rev (b) e roleteada com força de 600 N e mesma velocidade e avanço (c).	37
FIGURA 2.13 - Microestrutura da camada subsuperficial de espécimes de aço AISI 1045 nas condições apenas fresado (a) e roleteado (b).	38
FIGURA 2.14 - Microestruturas da camada subsuperficial de um corpo de prova de aço AISI 4140 apenas torneado (a) e de um roleteado com força de 750 N (b).	39
FIGURA 2.15 - Camada subsuperficial de amostras do aço DIN 20Cr4 após o torneamento (a) com velocidade e avanço iguais a 80 m/min e 0,06 mm/rev, respectivamente, e após o roleteamento (b) com quatro passes e força, avanço e velocidade iguais a 200 N, 0,04 mm/rev, 10 m/min, respectivamente.	42
FIGURA 2.16 - Efeito da pressão (P) e do número de passes (n) de roleteamento sobre a dureza superficial (a, b e c) e o perfil de microdureza subsuperficial (d, e e f) de corpos de prova de aço AISI 1060 submetidos à recozimento subcrítico, recozimento pleno e endurecimento por têmpera e revenimento, respectivamente.	44
FIGURA 2.17 - Efeito da força (a), do número de passes (b) e do avanço (c) de roleteamento sobre a dureza superficial de uma amostra de aço JIS-S38C.	45
FIGURA 2.18 - Dureza em diferentes profundidades da camada subsuperficial após o torneamento (a) e após o roleteamento com as pressões de 10 MPa (b) e 20 MPa (c).	47
FIGURA 2.19 - Processo de nucleação e propagação inicial de uma trinca superficial.	49
FIGURA 2.20 - Influência da tensão residual sobre a tensão resultante em um componente mecanicamente solicitado.	52
FIGURA 3.1 - Fluxograma do trabalho experimental.	54
FIGURA 3.2 - Microestrutura inalterada dos aços ABNT 1020 (a), 1065 (b) e 1080 (c).	55
FIGURA 3.3 - Microestrutura do aço ABNT 1080 em que verifica uma esferoidização parcial da perlita.	57
FIGURA 3.4 - Montagem para a realização dos ensaios de tração.	60
FIGURA 3.5 - Ferramenta empregada nos ensaios de roleteamento.	61
FIGURA 3.6 - Montagem da ferramenta de roleteamento e do seu sistema de pressurização junto ao torno CNC para realização dos ensaios de roleteamento dos corpos de prova.	61
FIGURA 3.7 - Desenhos dos corpos de prova de aço ABNT 1020 (a) e dos aços ABNT 1065 e 1080 (b) com as regiões roleteadas indicadas pelas áreas hachuradas.	62

FIGURA 3.8 - Perfilômetro e montagem utilizada para a medição de parâmetros de rugosidade nos corpos de prova roleteados e apenas usinados.	65
FIGURA 3.9 - Medição da microdureza superficial dos corpos de prova roleteados e apenas torneados.....	65
FIGURA 3.10 - Ilustração do corte realizado nos corpos de prova para a visualização da camada subsuperficial roleteada.....	67
FIGURA 3.11 - Medições realizadas na camada subsuperficial de um corpo de prova (a) e espaçamento mínimo entre a indentação e o contorno da superfície e entre indentações segundo a norma ASTM E384-11:2011 (ASTM INTERNATIONAL, 2011) (b).....	69
FIGURA 4.1 - Limites de escoamento e de resistência à tração (a) e coeficientes de encruamento (b) e de resistência (c) dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.....	71
FIGURA 4.2 - Influência da pressão (a), velocidade (b), avanço (c) e número de passes (d) de roleteamento sobre o desvio médio quadrático (R_q) dos corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.	73
FIGURA 4.3 - Influência da pressão (a), velocidade (b), avanço (c) e número de passes (d) de roleteamento sobre o desvio médio quadrático (R_q) dos corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.	74
FIGURA 4.4 - Influência da pressão (a), velocidade (b), avanço (c) e número de passes (d) de roleteamento sobre a altura máxima do pico do perfil (R_p) e a profundidade máxima do vale do perfil (R_v) dos corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.....	80
FIGURA 4.5 - Influência da pressão (a), velocidade (b), avanço (c) e número de passes (d) de roleteamento sobre a altura máxima do pico do perfil (R_p) e a profundidade máxima do vale do perfil (R_v) dos corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.....	81
FIGURA 4.6 - Ilustração dos parâmetros profundidade do núcleo do perfil (R_k), altura de pico reduzida (R_{pk}) e profundidade de vale reduzida (R_{vk}) em uma curva de razão portante (MR) do perfil (curva de Abbott-Firestone).....	86
FIGURA 4.7 - Influência da pressão (a), velocidade (b), avanço (c) e número de passes (d) de roleteamento sobre a profundidade do núcleo do perfil (R_k), a altura de pico reduzida (R_{pk}) e a profundidade de vale reduzida (R_{vk}) dos corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.	87
FIGURA 4.8 - Influência da pressão (a), velocidade (b), avanço (c) e número de passes (d) de roleteamento sobre a profundidade do núcleo do perfil (R_k), a altura de pico reduzida (R_{pk}) e a profundidade de vale reduzida (R_{vk}) das superfícies dos corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.	88

FIGURA 4.9 - Influência da pressão (a), velocidade (b), avanço (c) e número de passes (d) de roleteamento sobre a microdureza da superfície dos corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.	94
FIGURA 4.10 - Influência da pressão (a), velocidade (b), avanço (c) e número de passes (d) de roleteamento sobre o perfil de microdureza do aço ABNT 1020 após o roleteamento.....	98
FIGURA 4.11 - Influência da pressão (a), velocidade (b), avanço (c) e número de passes (d) de roleteamento sobre o perfil de microdureza do aço ABNT 1065 após o roleteamento.....	100
FIGURA 4.12 - Influência da pressão (a), velocidade (b), avanço (c) e número de passes (d) de roleteamento sobre o perfil de microdureza do aço ABNT 1080 após o roleteamento.....	102
FIGURA 4.13 - Perfis de microdureza da camada subsuperficial dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080 nas condições da TABELA 3.6.	105
FIGURA 4.14 - Microestrutura da camada subsuperficial de corpos de prova de aço ABNT 1020 submetidos a determinadas condições de roleteamento.	108
FIGURA 4.15 - Microestrutura da camada subsuperficial de corpos de prova de aço ABNT 1020 submetidos a determinadas condições de roleteamento.	109
FIGURA 4.16 - Microestrutura da camada subsuperficial de corpos de prova de aço ABNT 1065 submetidos a determinadas condições de roleteamento.	111
FIGURA 4.17 - Microestrutura da camada subsuperficial de corpos de prova de aço ABNT 1065 submetidos a determinadas condições de roleteamento.	112
FIGURA 4.18 - Microestrutura da camada subsuperficial de corpos de prova de aço ABNT 1080 submetidos a determinadas condições de roleteamento.	114
FIGURA 4.19 - Microestrutura da camada subsuperficial de corpos de prova de aço ABNT 1080 submetidos a determinadas condições de roleteamento.	115

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Alterações das superfícies usinadas que estão englobadas no conceito de integridade superficial.	22
TABELA 3.1 - Composição química dos aços-carbono utilizados neste trabalho.	55
TABELA 3.2 - Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração e de roleteamento.	59
TABELA 3.3 - Parâmetros de roleteamento estudados e os valores atribuídos a cada um durante os ensaios.	62
TABELA 3.4 - Faixa de pressões recomendadas pelo fabricante da ferramenta de roleteamento em função da dureza do componente a ser roleteado.	63
TABELA 3.5 - Parâmetros de roleteamento testados.	64
TABELA 3.6 - Condições de roleteamento dos corpos de prova de cada material submetidos à metalografia.	66
TABELA 4.1 - Valores médios dos limites de escoamento e de resistência à tração e dos coeficientes de encruamento e de resistência dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.	71
TABELA 4.2 - Variação dos valores médios de R_q com o aumento da pressão de roleteamento.	75
TABELA 4.3 - Variação dos valores médios de R_q com o aumento do avanço de roleteamento.	77
TABELA 4.4 - Variação dos valores médios de R_q com o aumento do número de passes de roleteamento.	78
TABELA 4.5 - Variação dos valores médios de R_p e R_v com o aumento da pressão de roleteamento.	83
TABELA 4.6 - Variação dos valores médios de R_p e R_v com o aumento do avanço de roleteamento.	84
TABELA 4.7 - Variação dos valores médios de R_p e R_v com o aumento do número de passes de roleteamento.	85
TABELA 4.8 - Variação dos valores médios de R_{vk} , R_k e R_{pk} com o aumento da pressão de roleteamento.	90
TABELA 4.9 - Variação dos valores médios de R_{vk} , R_k e R_{pk} com o aumento do avanço de roleteamento.	91

TABELA 4.10 - Variação dos valores médios de R_{vk} , R_k e R_{pk} com o aumento do número de passes de roleteamento.....	92
TABELA 4.11 - Variação da microdureza superficial com os parâmetros de roleteamento. ..	96
TABELA 4.12 - Variações da microdureza e da profundidade da camada subsuperficial afetada pelo roleteamento dos corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.	103
TABELA 4.13 - Variações da deformação plástica da camada subsuperficial afetada pelo roleteamento dos corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.....	117

RESUMO

A integridade superficial corresponde a um conjunto de características da superfície e da camada subsuperficial que tem grande influência sobre o desempenho funcional de componentes mecânicos em condições de desgaste, corrosão e fadiga, e é determinada pelos processos de fabricação empregados. Assim, tratamentos superficiais são utilizados junto a esses processos para a produção de uma integridade superficial adequada à função desejada. O roleteamento é um dos tratamentos superficiais que atuam pela deformação plástica a frio da superfície e da camada subsuperficial e o presente trabalho desenvolveu um estudo sobre a influência de alguns de seus parâmetros (pressão, velocidade, avanço e número de passes) sobre determinadas características da integridade superficial (rugosidade, microdureza superficial e subsuperficial e microestrutura) dos aços-carbono ABNT 1020, 1065 e 1080. Observou-se uma melhora significativa do acabamento após o roleteamento, porém a elevação da pressão (especialmente com a redução do teor de carbono) e do avanço (especialmente com o aumento do teor de carbono) causou um aumento da rugosidade. O aumento do número de passes, por sua vez, melhorou, em alguns casos, o acabamento. Em relação à microdureza da superfície após o roleteamento, sua elevação foi observada apenas no aço ABNT 1080. Além disso, o roleteamento em todas as condições avaliadas promoveu um aumento da microdureza da camada subsuperficial e da profundidade afetada em relação ao que foi encontrado nos corpos de prova apenas torneados. Entretanto, a elevação da pressão aumentou ainda mais a microdureza e a profundidade afetada, o aumento da velocidade reduziu ou não alterou a microdureza e a profundidade afetada e foram observadas influências variadas para o avanço e o número de passes. A análise microestrutural, por fim, mostrou que o aumento do teor de carbono implica em uma redução da deformação da camada subsuperficial provocada pelo roleteamento. Verificou-se nos aços ABNT 1020 e 1065 uma elevação da deformação com o aumento da pressão e uma redução desta com o aumento da velocidade e do avanço. O número de passes, por outro lado, afetou apenas a camada subsuperficial de aço ABNT 1020.

Palavras-chave: *Roleteamento, integridade superficial, aço-carbono, rugosidade, microdureza, microestrutura.*

1 INTRODUÇÃO

Uma parcela dos processos de fabricação mecânica utiliza, primeiramente, técnicas de usinagem apropriadas e, subsequentemente, aplica tratamentos mecânicos de superfície (STOUT, 1998). O objetivo destes tratamentos é produzir uma integridade superficial adequada às funções pretendidas, uma vez que a integridade superficial influencia as resistências à fadiga, à corrosão e ao desgaste, entre outras (ASTAKHOV *et al.*, 2010; STOUT, 1998). Como consequência desse procedimento, o tema engenharia de superfície tem ganhado notoriedade e credibilidade. Segundo Stout (1998), centros de excelência foram criados no Reino Unido e em outros países e periódicos internacionais altamente respeitados relatam técnicas e realizações neste campo. Os tratamentos mecânicos superficiais têm sido usados há centenas de anos, como no martelamento de espadas após o forjamento, mas foi na primeira metade do século XX que passaram a ter amplas aplicações industriais (ALTENBERGER, 2005). Atualmente, é difícil imaginar a prática tecnológica sem eles, particularmente nas indústrias automotiva, aeroespacial e de molas (SCHULZE, 2006).

Quase todos componentes mecânicos são susceptíveis à fadiga, que pode ocorrer em cerâmicas, metais e polímeros, porém a maior parte do seu estudo centra em metais e suas ligas devido à maior parte das falhas por fadiga ocorrer nesta classe de material (COURTNEY, 2005). Em aeronaves, o projeto contra a fadiga é tão importante quanto o projeto contra escoamento ou fratura convencional. Pela mesma razão, a fadiga é uma importante consideração em peças rotativas como eixos motrizes e pás de turbina. Em peças de maquinário, as falhas que ocorrem são quase sempre por fadiga (ABBASCHIAN *et al.*, 2008). A resistência à fadiga é fortemente influenciada pela condição da superfície, assim, no desenvolvimento dos tratamentos de superfície, trabalhou-se na definição de quais características superficiais afetam a resistência à fadiga (SCHULZE, 2006). Sabe-se que a resistência à fadiga pode ser atribuída ao acabamento superficial, ao estado de tensão residual e de dureza e à microestrutura da camada subsuperficial (EL-AXIR, 2000; RAO *et al.*, 2008; SCHULZE, 2006). Contudo, o benefício dos tratamentos superficiais está principalmente relacionado à indução de tensões residuais compressivas (BANNANTINE *et al.*, 1989).

Existe uma série de tratamentos de superfície como cementação, nitretação, endurecimento por indução, jateamento de granalha e roleteamento, entre outros (BANNANTINE *et al.*, 1989). Recentemente, porém, segundo Rao *et al.* (2008), foco tem

sido dado a métodos mecânicos que atuam por deformação plástica. Estes diferem entre si principalmente na forma como a superfície é deformada e na magnitude e distribuição de tensão residual e deformação plástica na camada subsuperficial (ŁABANOWSKI; OSSOWSKA, 2006). Os dois mais importantes tratamentos mecânicos superficiais são roleteamento e jateamento de granalha (BANNANTINE *et al.*, 1989). De acordo com Altenberger *et al.* (1999), estes são métodos mecânicos muito efetivos frequentemente aplicados a componentes estruturais nas indústrias automotiva e aeronáutica.

As primeiras aplicações do roleteamento foram componentes de simetria rotacional geometricamente simples como eixos para veículos, e as ferramentas de roleteamento eram, em sua maioria, operadas mecanicamente e altamente especializadas em componentes críticos como virabrequins (ALTENBERGER, 2005). Nos Estados Unidos da América, o roleteamento já era aplicado nos anos 1920 para aumentar a resistência de eixos do Ford T e nos anos 1930 também foram roleteados eixos de trens. Apesar do roleteamento ainda ser muito frequentemente aplicado a geometrias e componentes rotacionalmente simétricos, como eixos e rotores de turbina, válvulas, camisas de cilindros, roscas, pistões e pequenos filetes, ferramentas de roleteamento modernas são projetadas para geometrias muito mais complexas e não rotacionalmente simétricas. Atualmente, o roleteamento é o mais difundido tratamento superficial utilizado para minimizar o dano por fadiga em virabrequins, componentes que possuem uma geometria complexa com áreas sujeitas à considerável concentração de tensão (BLASÓN *et al.*, 2017).

Existem muitos componentes na indústria automotiva que são altamente solicitados e submetidos ao processo de roleteamento, como eixos e, especialmente, mangas de eixo cujas aplicações variam de carros a tratores agrícolas (ALTENBERGER, 2005). Especialmente na indústria aeronáutica, a redução de peso é um grande objetivo do projetista. Dessa forma, muitas aplicações de roleteamento também podem ser encontradas lá, como por exemplo, superfícies de pás de turbina, que podem ser roleteadas parcialmente ao longo das bordas de ataque ou completamente, e as conexões entre as pás e os discos de turbina. Além disso, existem muitos exemplos de aplicações médicas desse tratamento, especialmente no campo de componentes de endoprótese que são altamente solicitados e devem exibir alta resistência sob carregamento cíclico; exemplos típicos são implantes de articulações de quadril, nos quais a otimização da superfície é uma necessidade absoluta para se garantir longa vida útil. Componentes de instrumentos cirúrgicos submetidos a solicitações cíclicas em ambientes corrosivos também podem ser aperfeiçoados com o uso do roleteamento.

1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é o estudo da influência da concentração de carbono sobre alguns aspectos da integridade superficial de aços-carbono submetidos ao processo de roleteamento.

1.1.1 Objetivos específicos

Comparar a resposta de corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080 submetidos ao processo de roleteamento com a variação de quatro parâmetros (pressão, velocidade, avanço e número de passes) em termos da integridade superficial (rugosidade e microdureza superficial, perfil de microdureza e microestrutura), examinando, dessa forma, como a concentração de carbono nesses aços pode influenciar o comportamento da superfície e da camada subsuperficial resultante desse tratamento mecânico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Wong *et al.* (2014), com o objetivo de mitigar o risco de falha por fadiga em componentes de motores aeronáuticos (um dos desafios mais críticos da indústria aeronáutica), o jateamento de granalha é normalmente adotado, pois há considerável conhecimento do processo e do equipamento; isto é corroborado por Altenberger (2005), segundo o qual, a otimização das características da camada próxima à superfície por jateamento de granalha foi bem estabelecida nessa indústria. Entretanto, Wong *et al.* (2014) afirmam que, com novos projetos sendo incorporados, têm-se maiores exigências em relação à resistência à fadiga e esse método tradicional tem sido exigido além de sua capacidade. Neste contexto, o roleteamento aparece como uma opção viável já que oferece diversas vantagens, como a capacidade de produzir uma camada mais profunda de tensões residuais compressivas. Juijerm e Altenberger (2007) observam que, para muitas indústrias, o mais conhecido tratamento mecânico superficial é o jateamento de granalha que, devido a sua flexibilidade, pode ser empregado em componentes de quase qualquer forma. Entretanto, é irrefutável que ele normalmente aumenta a rugosidade do componente, especialmente quando este possui baixa dureza. Enquanto o jateamento de granalha exige um equipamento específico e pode prejudicar o acabamento superficial produzido pela operação anterior, o roleteamento pode ser realizado em máquinas-ferramenta convencionais (apenas fixando-se nelas o equipamento apropriado) e promove uma notável melhoria do acabamento superficial; o desvio médio aritmético (R_a) produzido comumente se encontra entre 0,2 a 0,8 μm , correspondendo ao obtido de operações de retificação (ABRÃO *et al.*, 2014a; LUCA *et al.*, 2005). O dano ao acabamento superficial produzido pelo jateamento de granalha pode facilitar a nucleação de trincas devido à microconcentração de tensão na superfície resultante (SCHULZE, 2006). É interessante observar também que no estudo de Altenberger *et al.* (1999) o jateamento de granalha de espécimes de aço AISI 304 promoveu uma tensão residual compressiva máxima maior que a do roleteamento, porém a tensão residual compressiva produzida pelo roleteamento se estendeu a uma profundidade bastante superior. Como a vida útil é governada mais pela profundidade do que pela intensidade do encruamento, o roleteamento se mostra superior ao jateamento de granalha também neste aspecto (ALTENBERGER *et al.*, 1999).

Processos que modificam a superfície de acordo com a aplicação desejada para melhorar o desempenho funcional do componente produzido, como o roleteamento, provavelmente serão muito rentáveis no futuro da fabricação, porém, para isso, muito precisa ser conhecido sobre a sua natureza e seus efeitos físicos sobre a superfície e a camada subsuperficial (STOUT, 1998). A popularização do roleteamento torna crucial saber como selecionar e controlar seus parâmetros visando atingir a integridade superficial desejada (EL-AXIR, 2000). A indução de determinadas propriedades funcionais na superfície e na camada subsuperficial de componentes mecânicos é ainda um processo iterativo e experimental (MEYER; KÄMMLER, 2016). Existem várias abordagens para examinar o efeito dos tratamentos sobre as superfícies (STOUT, 1998). Uma abordagem experimental submete superfícies produzidas sob condições bem definidas a ensaios dos quais se obtêm informações confiáveis. Uma segunda abordagem é a investigação científica para explicar o comportamento funcional da superfície modificada, o que implica na identificação das causas das diferentes características físicas produzidas. Uma terceira abordagem consiste em desenvolver modelos analíticos das interações superficiais durante o processo e comparar as previsões dos modelos com as superfícies produzidas. Neste trabalho, foram aplicadas a primeira e segunda abordagem para o estudo dos efeitos do roleteamento sobre aços-carbono com diferentes concentrações de carbono.

2.1 Roleteamento

O processo de roleteamento é um meio economicamente viável e efetivo de aprimoramento de superfícies cujo objetivo é induzir tensões residuais compressivas profundas e estáveis, promover o endurecimento da superfície e da camada subsuperficial e melhorar significativamente o acabamento do componente por meio da deformação plástica a frio da sua superfície e camada subsuperficial, melhorando, assim, sua integridade superficial e, conseqüentemente, sua resistência ao desgaste, à corrosão e à fadiga (RAO *et al.*, 2008; SEEMIKERI *et al.*, 2008). Ferramentas de roleteamento modernas são projetadas para se encaixarem em máquinas-ferramenta padronizadas de forma que o roleteamento fique completamente integrado à cadeia do processo de produção, facilitando a substituição de outros processos de acabamento superficial, como um passo final após a usinagem da geometria desejada (ALTENBERGER, 2005). Dessa forma, segundo Luca *et al.* (2005), os custos com o roleteamento correspondem aos do torneamento já que ele pode ser realizado em um torno convencional e ambos os processos podem ser realizados com apenas uma fixação

na máquina. Portanto, o roleteamento tem a vantagem de ser uma técnica de acabamento simples que reduz significativamente o tempo de processamento em comparação com o de outras técnicas, como a retificação ou o polimento manual (RODRÍGUEZ *et al.*, 2012).

O roleteamento torna os processos de produção de peças mais econômicos e contribui significativamente para a proliferação de projetos de baixo peso (ALTENBERGER, 2005). Dessa forma, com o conhecimento dos seus efeitos mecânicos e metalúrgicos por uma análise cuidadosa do processo, como o proposto neste trabalho, e um controle bem especificado de um amplo número de seus parâmetros, esse processo pode ser continuamente melhorado e fornecer superfícies que atendem mais adequadamente às necessidades funcionais de aplicações cada vez mais complexas e amplas (ALTENBERGER, 2005; STOUT, 1998).

2.1.1 Mecânica do roleteamento

O processo de roleteamento é caracterizado por passes de um elemento rolante (rolete ou esfera) sobre uma superfície com força normal controlada e suficiente para deformar plasticamente a frio os picos de rugosidade em direção aos vales de forma a achatá-los com movimentos longitudinais e rotacionais aplicados simultaneamente (ABRÃO *et al.*, 2014a; WONG *et al.*, 2014; YEN, 2004). Os parâmetros e fatores que afetam o desempenho do roleteamento incluem a velocidade e o avanço de roleteamento, a pressão (ou força normal aplicada à superfície), o material e o diâmetro do elemento rolante, o material e a rugosidade prévia do componente a ser roleteado, o número de passes e o meio lubrificante, que forma um filme elastohidrodinâmico entre o elemento rolante e a superfície do componente trabalhado, reduzindo o atrito e removendo calor gerado por atrito (ABRÃO *et al.*, 2014a; LUCA *et al.*, 2005; RODRÍGUEZ *et al.*, 2011). Luca *et al.* (2005) afirmam que a rugosidade original da superfície a ser roleteada parece exercer um importante efeito sobre a rugosidade final: quanto melhor a qualidade superficial obtida na usinagem prévia, melhor será a qualidade da superfície resultante do processo de roleteamento.

A FIGURA 2.1 ilustra os parâmetros de roleteamento velocidade (V), avanço (f) e força normal (F), além do efeito usual dessa operação sobre a tensão residual, a rugosidade, a microestrutura e a dureza da superfície e da camada subsuperficial. O processo mecânico elementar do roleteamento é representado pela pressão na zona de contato entre a peça e o elemento rolante, causada pela força de roleteamento, que cria estados de tensão triaxial na camada subsuperficial à medida que este se desloca pelo caminho definido pela velocidade e

avanço de roleteamento (ABRÃO *et al.*, 2015; SCHULZE, 2006). Assim, quando o limite de escoamento é excedido pela tensão equivalente, deformações plásticas locais ocorrem, criando-se tensões residuais compressivas e alterações microestruturais.

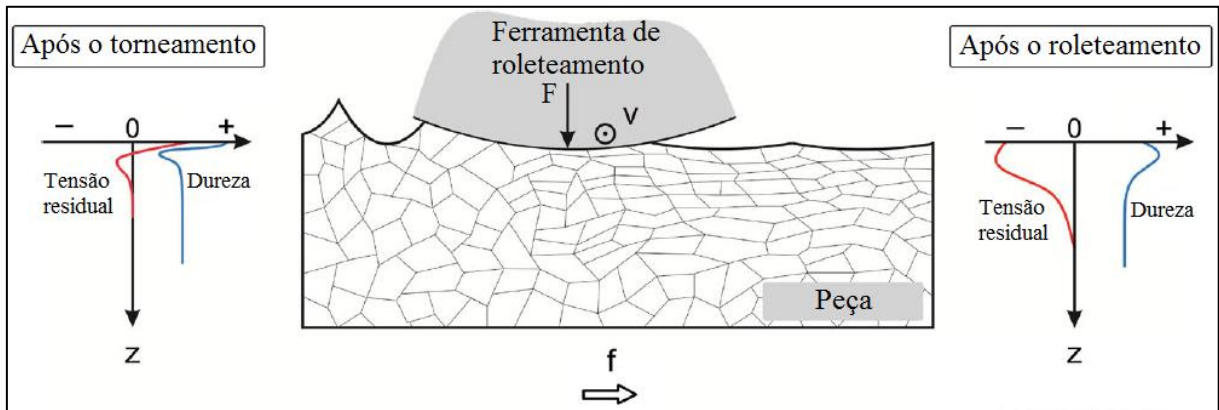


FIGURA 2.1 - Parâmetros de roleteamento, velocidade: (V), avanço (f) e força (F), e seus efeitos usuais sobre a microestrutura e os perfis de tensão residual e de dureza e sobre a rugosidade superficial de aços.

FONTE - Adaptado de ABRÃO *et al.*, 2015, p. 1940.

A FIGURA 2.2 apresenta o princípio de funcionamento e os componentes básicos de um sistema de roleteamento cuja operação é baseada no princípio hidrostático. Na ferramenta de roleteamento hidrostática, a esfera é suportada por um fluido com pressão suficiente para manter a esfera separada da superfície do encaixe de retenção e em contato mecânico apenas com a superfície a ser deformada, livre para girar sobre ela com um coeficiente de atrito muito baixo (YEN, 2004). Além de suportar a esfera, o fluido fornecido pela bomba de alta pressão do conjunto hidráulico tem o papel de refrigerante e lubrificante e exerce um carregamento sobre a esfera que produz uma força normal à superfície, constante e proporcional à pressão imposta (LUCA *et al.*, 2005; SARTKULVANICH, 2007). Os materiais preferidos para a esfera de roleteamento, segundo Abrão *et al.* (2014a), são carboneto de tungstênio e cerâmicas (como o nitreto de silício utilizado por Luca *et al.*, 2005, por exemplo) devido aos seus elevados módulos de elasticidade e resistência ao desgaste. Com o emprego da tecnologia hidrostática, a força normal depende somente da pressão da bomba hidráulica e essa técnica de roleteamento pode ser utilizada em superfícies cilíndricas, planas, perfiladas e cônicas, em locais onde ocorre mudança brusca de seção, etc. (RODRÍGUEZ *et al.*, 2012).

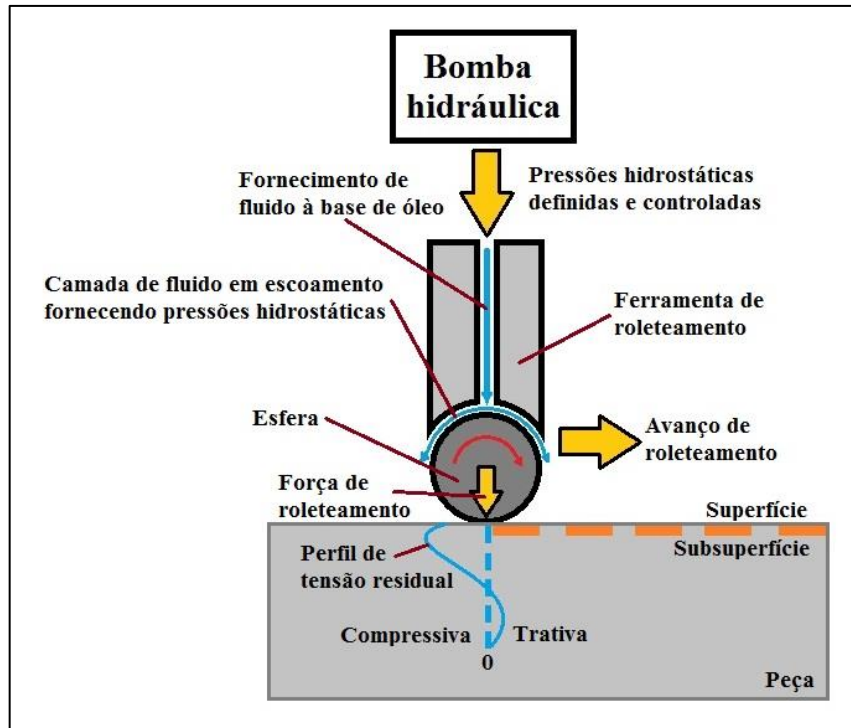


FIGURA 2.2 - Princípio de funcionamento e componentes básicos de um sistema de roleteamento hidrostático.

FONTE - Autor.

Segundo Schulze (2006), as forças aplicadas durante o processo de roleteamento de elementos mecânicos longos e delgados podem causar mudanças na forma desses elementos se elas não forem apropriadamente absorvidas por meio de um suporte. Dessa forma, é recomendado, nestes casos, o uso de roletes ou esferas em lados opostos da peça durante o roleteamento. Além disso, a qualidade da superfície da esfera ou rolete utilizado é essencial para o sucesso da operação de roleteamento (MORIMOTO, 1988).

2.2 Integridade superficial

Uma superfície pode ser definida como a fronteira entre a peça e o ambiente externo, e uma superfície tecnológica ou de engenharia é qualquer superfície produzida por métodos de fabricação convencionais ou não (ASTAKHOV *et al.*, 2010). Segundo Brinksmeier *et al.* (1984), a condição física de uma superfície é função do processamento do material e das condições de fabricação e pode ser resumida pela expressão “integridade superficial”. Mais precisamente, esta condição se refere ao estado topográfico, mecânico, químico e metalúrgico da superfície e da camada subsuperficial, incluindo o conhecimento

sobre as tensões residuais, a dureza e as estruturas metalúrgicas e sua relação com o desempenho funcional (ASTAKHOV *et al.*, 2010).

Testes realizados por Koster *et al.* (1970) demonstraram que os métodos de remoção de material e as suas variáveis têm um enorme efeito sobre a integridade superficial. Operações de usinagem sempre produzem uma influência combinada de efeitos mecânicos e térmicos, induzindo na superfície e na camada subsuperficial tensões de origem mecânica e térmica e mudanças mecânicas, metalúrgicas e químicas (ASTAKHOV *et al.*, 2010; BRINKSMEIER *et al.*, 1984; MACHADO *et al.*, 2009). A combinação desses efeitos mecânicos e térmicos na zona de contato entre a ferramenta e a peça juntamente com as propriedades do material e as características da estrutura produzida determinam a integridade superficial final (BRINKSMEIER *et al.*, 1984). Assim, a integridade superficial de superfícies usinadas engloba as alterações apresentadas na TABELA 2.1 e pode ser dividida em dois aspectos principais: o acabamento superficial e as características mecânicas e metalúrgicas da camada subsuperficial, como microestrutura, microdureza, tensões residuais, etc.

TABELA 2.1

Alterações das superfícies usinadas que estão englobadas no conceito de integridade superficial.

• Integridade superficial	• Acabamento	<ul style="list-style-type: none"> • Ondulações • Falhas • Rugosidade 	
	• Alterações subsuperficiais	• Fatores mecânicos	<ul style="list-style-type: none"> • Deformação plástica • Rebarbas • Alterações de microdureza • Micro ou macro trincas • Tensões residuais
		• Fatores metalúrgicos	<ul style="list-style-type: none"> • Recristalização • Transformações metalúrgicas

FONTE - Adaptado de MACHADO *et al.*, 2009, p. 276.

A FIGURA 2.3 apresenta os aspectos da integridade superficial que são mais afetados como resultado dos tratamentos mecânicos superficiais. Estes incluem principalmente alterações características da topografia e da microestrutura, assim como das distribuições de tensão residual e do encruamento (ALTENBERGER; SCHOLTES, 2000).

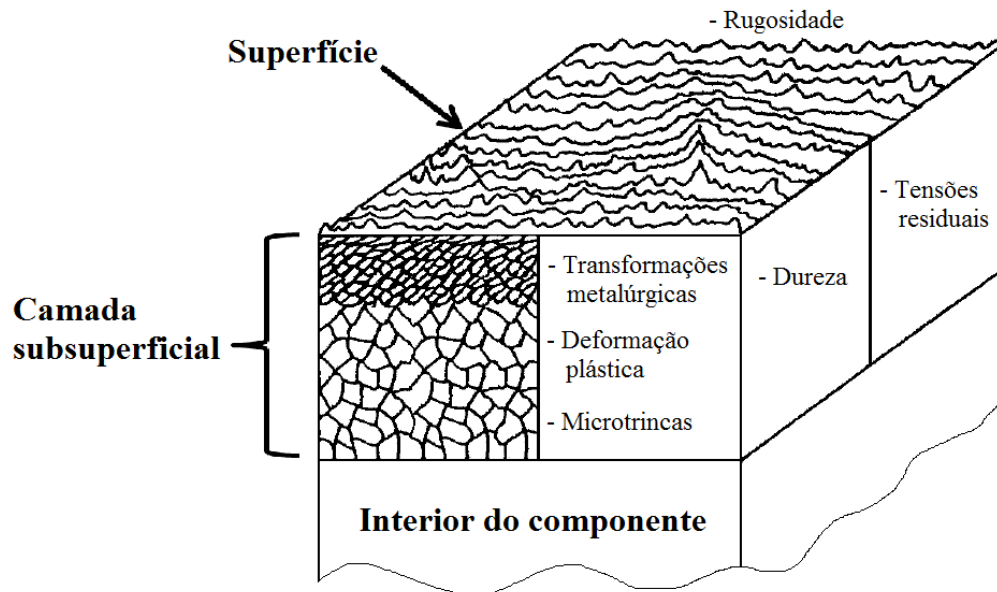


FIGURA 2.3 - Aspectos da integridade superficial mais afetados por tratamentos mecânicos superficiais.
 FONTE - Adaptado de ALTENBERGER e SCHOLTES, 2000, p. 383.

As características de desempenho que são normalmente sensíveis à integridade superficial incluem resistência à fadiga, resistência à fratura, taxa de corrosão, comportamento tribológico (atrito, desgaste e lubrificação), precisão dimensional, etc. (ASTAKHOV *et al.*, 2010). Dessa forma, o controle da integridade superficial tem como objetivo garantir as necessárias propriedades funcionais das superfícies na fabricação de peças e componentes de máquinas, garantindo-lhes uma vida adequada. Isto pode ser feito selecionando-se o material, a construção e o processamento, particularmente o da superfície, adequados à sua aplicação funcional. Para isso, é necessário conhecer quantitativamente a influência dos fatores que governam a integridade superficial e os processos de fabricação, bem como suas interações, sobre as variáveis de resposta (SEEMIKERI *et al.*, 2008). A base de dados para a caracterização da integridade superficial é geralmente produzida a partir de experimentos e práticas extensas, já que existem muitos parâmetros de processo que tornam a análise quantitativa da integridade superficial bastante complicada.

Segundo Yen (2004), a maior parte da pesquisa relacionada ao roleteamento focou na determinação experimental das relações do acabamento superficial e do estado de tensão residual com os parâmetros de roleteamento para aplicações específicas. Mais recentemente, porém, no estudo de Abrão *et al.* (2014a) foi feita uma análise da influência do roleteamento em amostras de aço AISI 1060 sujeitas a diferentes tratamentos térmicos avaliando-se também outros aspectos da integridade superficial, como a dureza superficial, a microestrutura e o perfil de microdureza subsuperficial, todos com reconhecida influência

sobre a resistência à fadiga do material. Além disso, como afirmado por Abrão *et al.* (2014a), a relação entre propriedades dos materiais e parâmetros de roleteamento ainda não foi totalmente explorada e entendida e resultados inconsistentes em relação à influência dos parâmetros de roleteamento sobre propriedades como dureza e acabamento superficial são frequentemente observados. Portanto, se mostra importante dar prosseguimento ao estudo das relações entre as propriedades da superfície e da camada subsuperficial de componentes mecânicos e os parâmetros de roleteamento. Por meio de um conhecimento abrangente das superfícies associadas ao processo, é possível definir os parâmetros de processo que garantam que a condição da superfície e das camadas subsuperficiais seja compatível com a função pretendida para a superfície (STOUT, 1998). Sabe-se, por exemplo, que somente forças de roleteamento otimizadas aumentam a resistência à fadiga, pois forças de roleteamento muito baixas não têm efeito pronunciado sobre o comportamento em fadiga e forças de roleteamento muito altas podem até piorá-lo pela indução de microtrincas (ALTENBERGER, 2005).

A análise metalográfica e a medição de microdureza são ferramentas valiosas na avaliação da integridade superficial (KOSTER *et al.*, 1970). Estes procedimentos são capazes de revelar áreas críticas com relação à integridade superficial quando se considera as características de uma combinação material/processo particular. A análise metalográfica, complementada por outras ferramentas de caracterização de materiais, é fundamental para a compreensão do comportamento dos aços, permitindo determinar mudanças visuais na camada subsuperficial em maiores ampliações e relacionar propriedades e estruturas em pequena escala, já que a maior parte das características estruturais determinantes para o desempenho dos metais está na faixa de 10 nm até 1 mm (faixa coberta por várias técnicas metalográficas); podem ser identificadas camadas termicamente afetadas, trincas e mudanças na estrutura do grão resultantes de transformações de fase ou deformação plástica (COLPAERT, 2008; KOSTER *et al.*, 1970). A análise metalográfica permite analisar características estruturais do componente estudado, testar hipóteses relativas a um determinado comportamento apresentado por esse material e investigar as possíveis causas estruturais para esse comportamento (COLPAERT, 2008). Além disso, medições de microdureza também são extremamente úteis, já que confirmam alterações visuais e ajudam a identificar mudanças que não são discerníveis em uma análise microscópica da camada subsuperficial (KOSTER *et al.*, 1970).

Como a qualidade superficial é de grande importância para o desempenho de componentes mecânicos (sabe-se, por exemplo, que a rugosidade age como concentrador de tensão na superfície, promovendo a nucleação e a propagação de trincas por fadiga), é

importante também avaliar as irregularidades superficiais que caracterizam a integridade superficial de componentes mecânicos (SCHULZE, 2006).

2.2.1 Acabamento superficial

O acabamento de uma superfície usinada é composto por uma combinação de fatores que podem ser divididos em desvios microgeométricos e macrogeométricos. Por sua vez, aqueles correspondem à rugosidade, ondulações e falhas (MACHADO *et al.*, 2009). As falhas e as ondulações podem ser evitados em muitos casos; a rugosidade superficial, por sua vez, é inevitável e é a magnitude dominante do acabamento superficial relacionada ao funcionamento de superfícies. É importante mencionar também que a qualidade da superfície processada por roleteamento pode servir como um indicador da instabilidade de cisalhamento do material da superfície que normalmente deve ser evitada quando são definidos os valores dos parâmetros do processo (KUZNETSOV *et al.*, 2015). Isto mostra mais uma vez a importância da rugosidade resultante do processo de roleteamento para o estudo proposto por este trabalho.

2.2.1.1 Rugosidade

A rugosidade de uma superfície usinada resulta de características do processo de corte como marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta, etc. (MACHADO *et al.*, 2009). Em relação ao processo de roleteamento, os parâmetros apresentados anteriormente (pressão ou força normal, material e rugosidade prévia da superfície, avanço, número de passes e lubrificação) têm grande importância no alcance de valores finais ótimos de rugosidade (RODRÍGUEZ *et al.*, 2011).

Os experimentos de roleteamento realizados por Sartkulvanich (2007) com o aço AISI 52100 (dureza entre 58 e 60 HRC) mostraram que, com o aumento do avanço de 0,02 para 0,08 mm/rev, o desvio médio aritmético (R_a) aumentou de 0,2 para 0,4 μm ; a mesma tendência observada na simulação. Segundo Sartkulvanich (2007), a distância entre marcas sucessivas da esfera aumenta com o avanço e, assim, ela tem menos chances de suavizar ou achatar todas as arestas das irregularidades; isto é, aprofunda-se mais os vales de rugosidade ao invés de se suavizar os cumes, prejudicando a superfície. Para uma superfície mais suave, Sartkulvanich (2007) recomenda que o avanço de roleteamento seja menor que o da operação de torneamento prévia, pois assim a ferramenta tem mais chances de planificar os picos de

rugosidade e produzir maior quantidade de deformação plástica na superfície devido à sobreposição de marcas sucessivas da esfera. Isto é corroborado por Klocke e Liermann (1998), segundo os quais, se o mesmo avanço for utilizado na usinagem e no roleteamento, a melhora do acabamento superficial não é alcançada, pois o movimento da esfera será paralelo às marcas de avanço da superfície torneada e não haverá achatamento dos picos de rugosidade. Além disso, Sartkulvanich (2007) verificou que a pressão de roleteamento tem o mais importante efeito sobre a rugosidade: o aumento da pressão de roleteamento de 320 até 360 bar implicou em melhor acabamento (o valor de R_a foi reduzido de 0,5 para 0,2 μm). O aumento posterior da pressão para 400 bar, por sua vez, causou um pequeno prejuízo do acabamento, aumentando o valor de R_a para 0,3 μm .

O estudo realizado por Abrão *et al.* (2014b) mostrou que a rugosidade após o torneamento do aço AISI 1060 plenamente recozido (290 HV), como mostrado na FIGURA 2.4, é reduzida em qualquer condição de roleteamento, mesmo sob a menor pressão (50 bar) e um passe, onde a altura total do perfil (R_t) foi reduzida de 9 μm para cerca de 1,5 μm . O aumento da pressão acima de 50 bar, por sua vez, promoveu um prejuízo do acabamento superficial devido à crescente deformação plástica e ao lascamento e abaulamento da superfície desse material; com 200 bar e três passes, o valor de R_t foi reduzido para cerca de 6,3 μm . Além disso, não se verificou uma influência considerável do número de passes sobre o acabamento superficial.

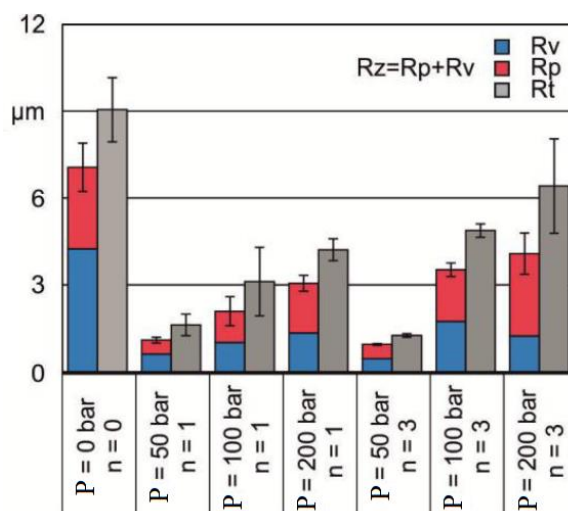


FIGURA 2.4 - Efeito da pressão (P) e do número de passes (n) de roleteamento sobre a profundidade máxima do vale do perfil (R_v), a altura máxima do pico do perfil (R_p) e a altura total do perfil (R_t).

FONTE - ABRÃO *et al.*, 2014b, p. 34.

O estudo realizado por Luca *et al.* (2005) com um aço tratado termicamente (dureza de 59 HRC) mostrou que a pressão e o avanço foram os parâmetros de roleteamento que mais influenciaram o desvio médio aritmético (Ra) da superfície. A velocidade e todas as suas interações mostraram ter influência desprezível sobre o acabamento superficial considerando um nível de significância de 95%. Em geral, como no exemplo da FIGURA 2.5, para uma mesma condição de torneamento prévio, o aumento da pressão (entre 30 e 38 MPa) e a redução do avanço de roleteamento (entre 0,06 e 0,20 mm/rev) promoveram uma melhoria da rugosidade superficial.

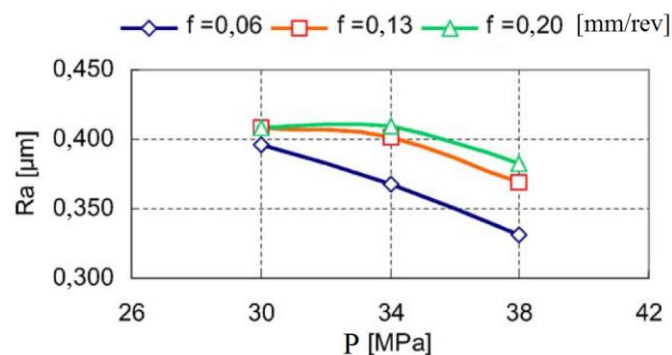


FIGURA 2.5 - Efeito da pressão (P) e do avanço (f) de roleteamento sobre o desvio médio aritmético (Ra) da superfície roleteada após um torneamento prévio com ferramenta de raio de ponta igual a 0,4 mm e avanço de corte de 0,08 mm/rev.

FONTE - Adaptado de LUCA *et al.*, 2005, p. 255.

No estudo desenvolvido com o aço de baixo carbono Steel-37 (220 HV), El-Axir (2000) verificou uma forte interação entre velocidade, força, avanço e número de passes de roleteamento sobre o desvio médio aritmético (Ra), porém, em geral, observou-se a deterioração da superfície com o aumento da velocidade (entre 9,27 e 83,41 m/min), justificada por um aumento da vibração no sistema máquina-ferramenta. Além disso, observou-se que, em geral, o aumento da força de 50 até 250 N produziu um melhor acabamento, porém, com forças entre 250 e 450 N, ocorreu a deterioração da superfície, provavelmente devido a falhas por cisalhamento da camada subsuperficial que levaram à sua descamação (flaking). Verificou-se também que, em geral, a redução do avanço (entre 0,06 e 0,34 mm/rev) forneceu melhor acabamento superficial, pois a deformação é maior e o escoamento de metal é mais regular, e que o aumento do número de passes (até quatro) melhorou o acabamento superficial devido ao aumento da homogeneidade da estrutura; acima

de quatro passes de roleteamento, o endurecimento excessivo da camada subsuperficial pode provocar sua descamação.

De forma similar, no roleteamento de espécimes do aço de baixo carbono JIS-S38C recozido com uma esfera de metal duro com 5 mm de diâmetro realizado por Morimoto (1988) utilizando força, velocidade e avanço de roleteamento iguais a 60 N, 98 m/min e 0,05 mm/rev, respectivamente, foi verificado que o desvio médio aritmético (Ra) da superfície previamente torneada foi reduzido à medida que se aumentou o número de passes de um até três. Após um, dois ou três passes de roleteamento, o valor de Ra foi reduzido de 4,01 μm para 0,46, 0,10 e 0,09 μm , respectivamente.

Os resultados de Murthy e Kotiveerachari (1981) mostram uma melhora da altura máxima do perfil (Rz) com o aumento do número de passes de roleteamento e a aplicação de uma velocidade entre 30 e 40 m/min, porém essa melhora é reduzida com um número de passes superior a quatro. Além disso, o aumento da força também levou a uma melhora do acabamento superficial, porém, com uma força excessiva, ocorreu falha por cisalhamento e descamação da superfície. Por fim, verificou-se um aumento do valor de Rz com o aumento do avanço, independentemente da força de roleteamento aplicada.

O estudo de Łabanowski e Ossowska (2006) mostrou que o roleteamento da superfície usinada de espécimes do aço inoxidável duplex UNS S32550 com a força de 70 N promoveu uma redução do desvio médio aritmético (Ra) de 0,44 para 0,06 μm . Essa melhora pode ser constatada visualmente na FIGURA 2.6(a) e na FIGURA 2.6(b). O aumento da força para 120 e 160 N, porém, causou um aumento de Ra em relação ao obtido com 70 N, atingindo-se 0,08 e 0,20 μm , respectivamente. O aumento da força de roleteamento para 160 N resultou nas irregularidades observadas na FIGURA 2.6(c).

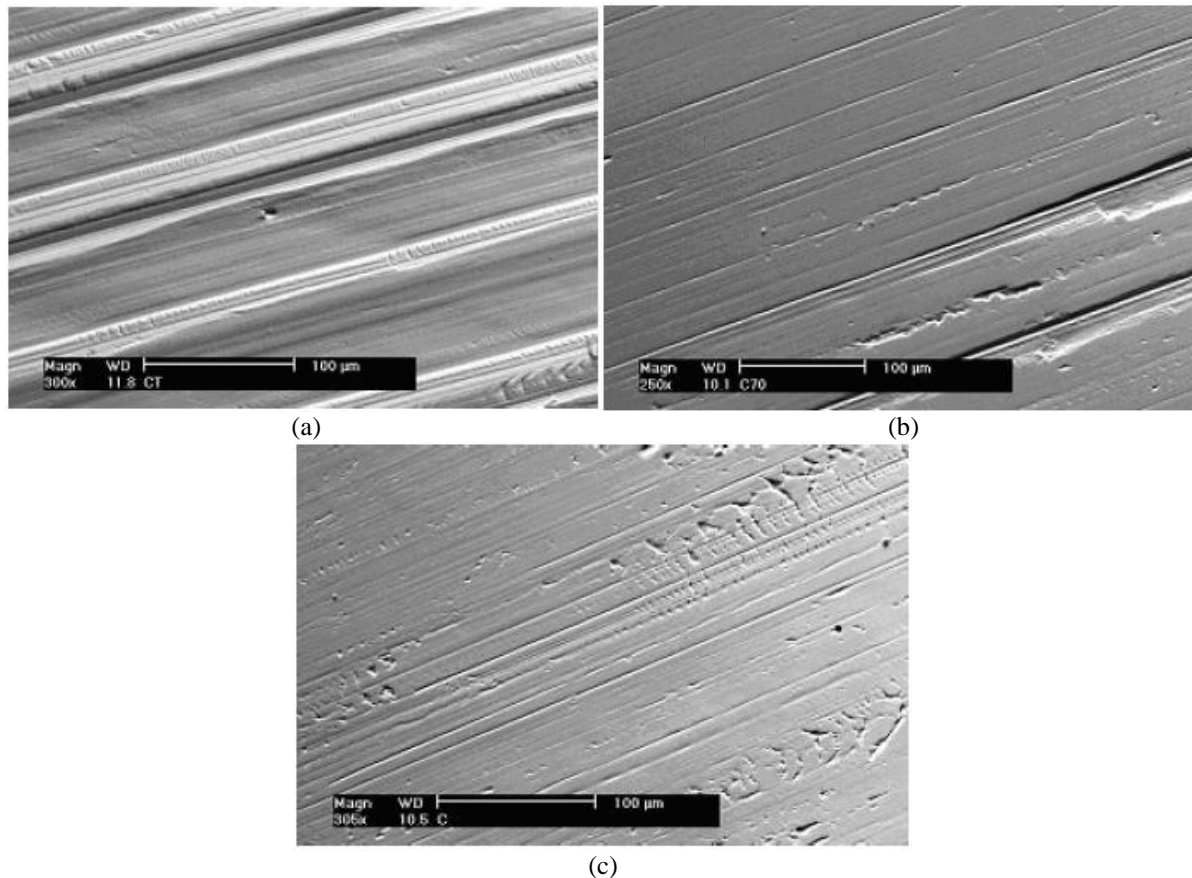


FIGURA 2.6 - Superfícies dos corpos de prova de UNS S32550 após a usinagem (a) e após o roleteamento com a força de 70 N (b) e 160 N (c).

FONTE - LABANOWSKI e OSSOWSKA, 2006, p. 48.

Seemikeri *et al.* (2008) avaliaram a influência da pressão, da velocidade, do diâmetro da esfera e do número de passes de roleteamento sobre a rugosidade de amostras do aço AISI 1045 e verificaram uma forte interação entre eles. Em geral, verificou-se que o aumento da velocidade (de 1,91 para 25,13 m/min), da pressão (de 5,88 para 19,62 bar) e do número de passes (de um para dois) e a redução do diâmetro da esfera (de 12 para 8 mm) promoveram a redução da rugosidade. Na condição que promoveu o melhor acabamento (25,13 m/min, 19,62 bar, um passe e 12 mm de diâmetro), o desvio médio aritmético (Ra) foi reduzido, em média, de 4 para 0,53 μm .

No estudo realizado por Gharbi *et al.* (2011), foi analisada a influência da velocidade, da força e do avanço de roleteamento sobre o desvio médio aritmético (Ra) da superfície de corpos de prova de aço AISI 1010. Constatou-se que, considerando avanço e força constantes, a relação entre a velocidade e Ra foi aproximadamente parabólica, com Ra passando por um mínimo em uma velocidade intermediária. Em relação à influência do avanço, para força de 400 N e velocidades menores que 70 m/min, o valor de Ra aumentou

com o aumento do avanço (entre 0,1 e 0,42 mm/rev). O oposto ocorreu quando a velocidade foi maior que 70 m/min; na velocidade de 70 m/min, por sua vez, o avanço não influenciou Ra independentemente da força aplicada. Além disso, o valor de Ra foi significativamente afetado pela força: o aumento da força (entre 200 e 600 N) mostrou uma tendência de prejuízo do acabamento superficial, especialmente sob altas velocidades. Segundo Gharbi *et al.* (2011), isto ocorre porque altas forças causam falha por cisalhamento nas camadas subsuperficiais que, por sua vez, levam à descamação da superfície.

No trabalho de Rodríguez *et al.* (2012) sobre a influência da velocidade, da pressão e do avanço de roleteamento sobre o desvio médio aritmético (Ra) de amostras do aço AISI 1045, verificou-se que, para qualquer condição de torneamento prévio, a velocidade (entre 75 e 150 m/min) e a pressão (entre 10 e 25 MPa) não apresentaram grande influência sobre Ra, porém o avanço (entre 0,025 e 0,4 mm/min) mostrou uma influência significativa sobre Ra. A diminuição do avanço promoveu a redução do valor de Ra. Em várias condições de roleteamento, o valor de Ra foi reduzido em mais de uma ordem de magnitude em relação ao obtido após o torneamento.

Kuznetsov *et al.* (2015) avaliaram a influência do número de passes sobre a qualidade superficial de amostras do aço DIN 20Cr4 roleteadas utilizando-se força, avanço e velocidade iguais a 200 N, 0,04 mm/rev e 10 m/min, respectivamente, e quatro ou oito passes de roleteamento. Conforme verificado na FIGURA 2.7, a utilização de oito passes levou a um prejuízo da qualidade superficial em relação à obtida com quatro passes: a superfície passou a exibir características de adesão, transferência e destacamento de material. Além disso, Kuznetsov *et al.* (2015) estudaram a influência da força de roleteamento sobre a qualidade superficial aplicando-se um passe, velocidade e avanço iguais a 10 m/min e 0,04 mm/rev, respectivamente, e forças de 400 e 600 N. As imagens mostradas na FIGURA 2.8 indicam que o aumento da força de 400 para 600 N produziu uma grande deterioração da superfície. Como já visto, forças excessivamente altas induzem instabilidade de cisalhamento na camada subsuperficial que resulta em danos e irregularidades superficiais.

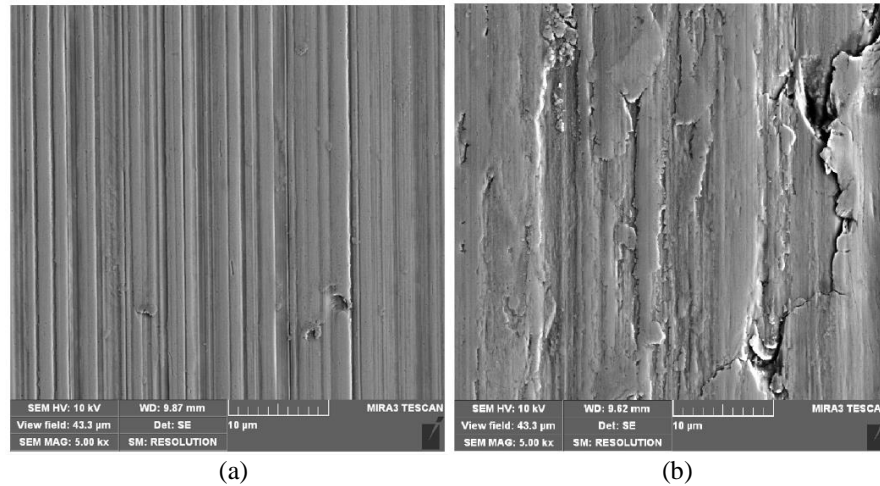


FIGURA 2.7 - Superfícies de aço DIN 20Cr4 roleteadas a seco com força, avanço e velocidade iguais a 200 N, 0,04 mm/rev e 10 m/min, respectivamente, e com quatro passes (a) e oito passes (b).

FONTES - KUZNETSOV *et al.*, 2015, p. 331 e 332.

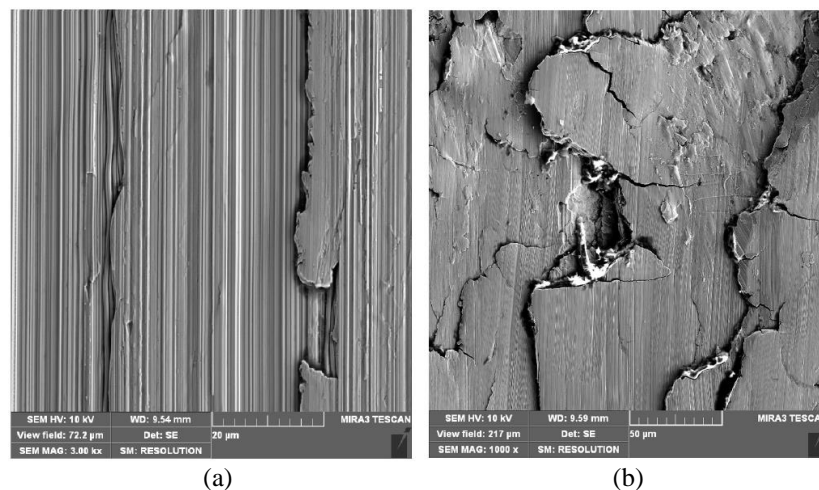


FIGURA 2.8 - Superfícies de aço DIN 20Cr4 roleteadas a seco com um passe, avanço e velocidade iguais 0,04 mm/rev e 10 m/min, respectivamente, e forças de 400 N (a) e 600 N (b).

FONTES - KUZNETSOV *et al.*, 2015, p. 331 e 332.

No trabalho realizado por Rodríguez *et al.* (2011), superfícies fresadas em aço AISI 1045 (250 HBN) foram roleteadas para se avaliar a influência da velocidade, do número de passes e da pressão sobre o desvio médio aritmético (R_a) e a altura máxima do perfil (R_z). Conforme mostrado na FIGURA 2.9(a), verificou-se que quanto maior a velocidade (entre 5, 10 e 15 m/min) melhor a rugosidade superficial resultante e que o aumento de um para dois passes melhorou ainda mais o acabamento superficial, em até 60%. A FIGURA 2.9(b) mostra que, com os demais parâmetros constantes, a pressão (30, 35 e 40 MPa) teve pequena influência sobre R_a e R_z , porém, com o aumento da pressão, o valor de R_a torna-se

ligeiramente menor e o de Rz ligeiramente maior. Segundo Rodríguez *et al.* (2011), com o aumento da pressão, a esfera começa a marcar a superfície produzindo mais ranhuras. Além disso, os resultados para 10 MPa mostraram que, em relação a superfície apenas fresada, os valores de Ra e Rz melhoraram em cerca de 90% (de 3,56 e 30,6 μm para 0,301 e 2,22 μm , respectivamente).

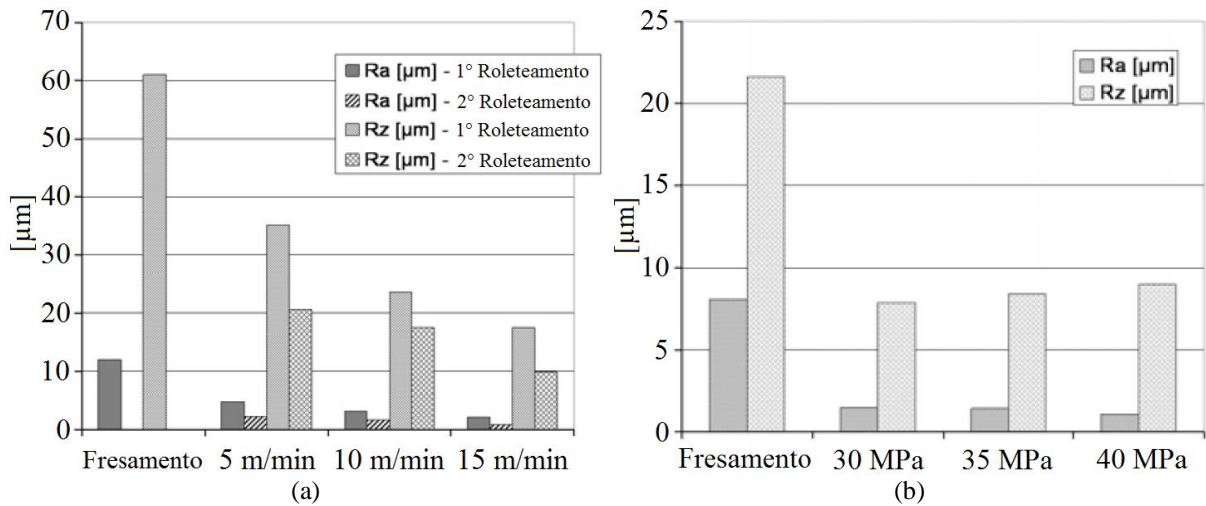


FIGURA 2.9 - Influência da velocidade e do número de passes (a) e da pressão (b) sobre o desvio médio aritmético (Ra) e a altura máxima do perfil (Rz) de superfícies de aço AISI 1045 roleteadas.

FONTE - Adaptado de RODRÍGUEZ *et al.*, 2011, p. 227 e 228.

Prabhu *et al.* (2014) avaliaram a rugosidade de corpos de prova de aço AISI 4140 antes e após o roleteamento e verificaram que o aumento da força (entre 250, 500 e 750 N) provocou uma redução progressiva do desvio médio aritmético (Ra): redução do valor de Ra da superfície apenas torneada de 4,84 μm para 0,69, 0,486 e 0,242 μm , respectivamente. Na melhor condição (750 N), a redução foi de mais de 95%. Segundo os autores, tal suavização pode levar a melhorias significativas na resistência à nucleação de trincas por fadiga e assim contribuir para o prolongamento da vida em fadiga.

2.2.2 Camada subsuperficial

Além dos aspectos tratados na seção 2.2.1, é muito importante que as características da camada subsuperficial também sejam identificadas, principalmente quando são aplicadas a componentes submetidos a altas tensões cíclicas, ou ainda que atuem em condições de alta temperatura ou em ambientes corrosivos. Conforme apresentado na TABELA 2.1, as principais características subsuperficiais são de natureza mecânica

(deformação plástica) ou metalúrgica (transformações metalúrgicas e microdureza). Não existe uma relação simples e única entre o estado de tensão residual e a resistência à fadiga; dessa forma, a microestrutura e o estado do material próximo à superfície sob investigação precisam ser levados em consideração (ALTENBERGER; SCHOLTES, 2000). Portanto, é natural que o progresso na otimização mecânica de superfícies seja feito com base em investigações das microestruturas e de suas distribuições e interação com diferentes estados de carregamento.

2.2.2.1 Deformação plástica

Entre as várias alterações da camada subsuperficial produzidas pelos tratamentos mecânicos superficiais, destaca-se a deformação plástica que ocorre, no caso do roleteamento, devido à ação da esfera ou rolete. A deformação plástica a frio (em temperaturas baixas em relação à sua temperatura de fusão) de um metal policristalino ocorre principalmente pelo movimento das deslocações existentes e pela criação de deslocações adicionais, produzindo mudanças microestruturais que incluem a alteração na forma dos grãos e o aumento da densidade de deslocações (CALLISTER, 2001; COURTNEY, 2005; SEEMIKERI *et al.*, 2008). A interação entre as deslocações nos planos de escorregamento que se intersectam promove um aumento constante e progressivo da dureza com o aumento da deformação plástica a frio, conhecido como encruamento, o que torna o metal cada vez mais duro e frágil; não é possível encruá-lo além de um determinado limite sem causar trincas (SEEMIKERI *et al.*, 2008). A presença de tensões residuais em um corpo processado mecanicamente resulta de distribuições não uniformes de deformação elástica na sua estrutura, decorrentes da introdução de deformação plástica não uniforme (EBERT, 1974). Uma fração da energia gasta na deformação é armazenada no metal como energia de deformação associada às zonas de tração, de compressão e de cisalhamento ao redor das deslocações criadas (CALLISTER, 2001). Dessa forma, as tensões residuais também aumentam com o aumento da distorção da microestrutura e da densidade de defeitos (SEEMIKERI *et al.*, 2008).

Na maioria dos materiais metálicos, o aumento da densidade de deslocações nas camadas próximas à superfície (algumas vezes auxiliadas por mecanismos de endurecimento adicionais como transformação martensítica induzida por deformação) leva a uma considerável redução da amplitude de deformação plástica durante o processo de fadiga se as camadas afetadas são suficientemente profundas, aumentando, como consequência, a vida do componente (ALTENBERGER, 2005). As microestruturas induzidas por roleteamento

próximas à superfície podem ser muito variadas e dependem fortemente dos parâmetros de processo escolhidos bem como do próprio material, porém, segundo Altenberger (2005) e El-Axir (2000), quanto maior a pressão ou força de roleteamento, maior a profundidade da camada afetada e menor a amplitude de deformação plástica durante o carregamento cíclico, ou seja, maior a melhoria da vida em fadiga (desde que altas forças de roleteamento não induzam trincas na superfície).

Os resultados obtidos por Abrão *et al.* (2014b), apresentados na FIGURA 2.10, mostram que a deformação plástica da camada subsuperficial de aço AISI 1060 plenamente recozido (290 HV) é de difícil percepção após o torneamento ou o roleteamento com 50 bar e um passe, porém a deformação plástica, assim como a profundidade da zona afetada, aumentou gradualmente com a pressão e com o número de passes.

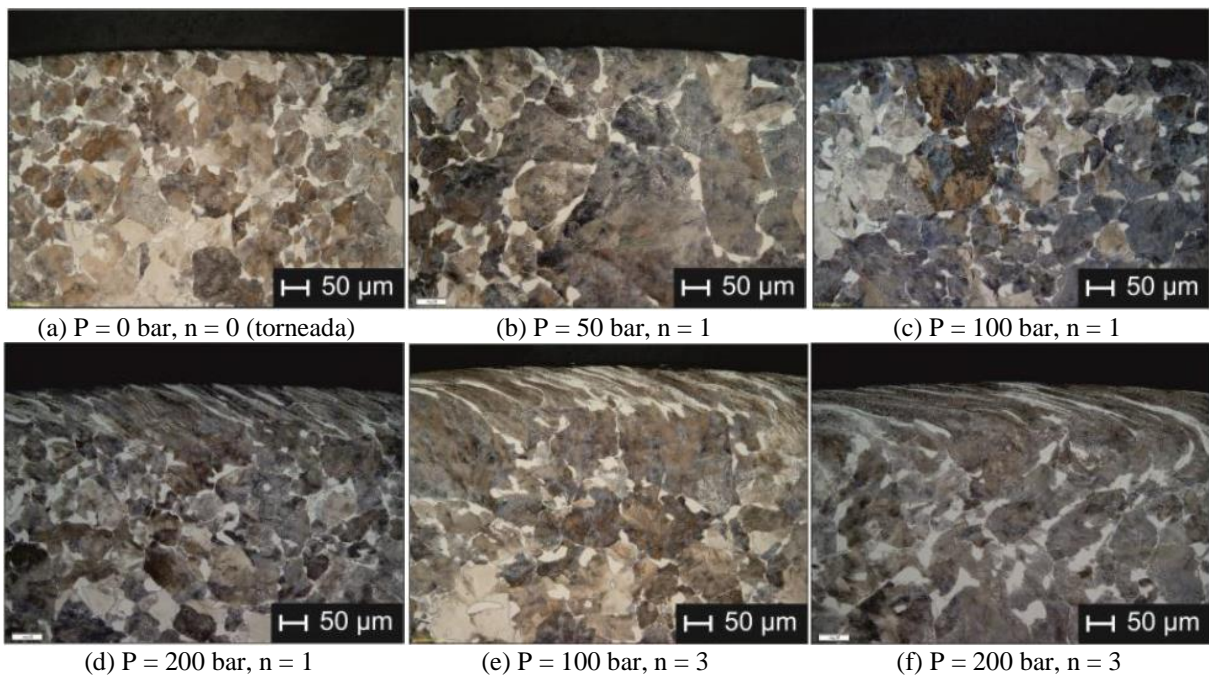


FIGURA 2.10 - Efeito da pressão (P) e do número de passes (n) de roleteamento sobre a microestrutura da camada subsuperficial de corpos de prova de aço AISI 1060 plenamente recozidos.

FONTE - ABRÃO *et al.*, 2014b, p. 35.

Sartkulvanich (2007) verificou em seu estudo com o aço AISI 52100 (58 e 60 HRC) que o aumento da pressão de roleteamento produziu um aumento da quantidade de deformação plástica na superfície e na camada subsuperficial do material, o que implica em mais vales de rugosidade sendo preenchidos durante o processo, levando a um aumento da dureza superficial e das tensões residuais compressivas.

No estudo de Abrão *et al.* (2014a) sobre a influência do roleteamento em espécimes do aço AISI 1060 sujeitos a recozimento subcrítico (295 HV), recozimento pleno (290 HV) e endurecimento por têmpera e revenimento (750 HV), verificou-se que o material plenamente recozido apresentou deformação superficial mais severa que os outros em uma mesma condição de roleteamento devido a sua menor dureza superficial; quanto maior a dureza superficial, menor a deformação plástica da camada subsuperficial sob uma mesma pressão, independentemente do número de passes. Além disso, constatou-se nos materiais recozidos uma interação entre pressão e número de passes: a pressão afetou mais a microestrutura, mas o aumento dos dois parâmetros promoveu um claro aumento da deformação da camada subsuperficial. Já no material endurecido, as condições empregadas (pressões de 200 e 300 bar com um ou três passes) não influenciaram a deformação plástica da microestrutura martensítica da camada subsuperficial.

Em seu trabalho com o aço de baixo carbono JIS-S38C, Morimoto (1988) constatou que a camada subsuperficial encruada atingiu uma profundidade superior a 200 μm na condição de roleteamento com carga máxima (140 N), um passe e velocidade e avanço iguais a 98 m/min e 0,05 mm/rev, respectivamente. Quando se avaliou a influência do número de passes sobre a camada subsuperficial sob a condição de roleteamento constante com força de 60 N e mesmos velocidade e avanço citados acima, verificou-se que o aumento do número de passes para três implicou em um aumento da profundidade encruada até 200 μm , quase a mesma profundidade obtida anteriormente com cargas maiores ou iguais a 107 N e com um passe apenas, mostrando que o número de passes teve o mesmo efeito que a pressão sobre a deformação da camada subsuperficial.

A microestrutura obtida por Akkurt (2011) após o roleteamento dos espécimes de aço AISI D3 (FIGURA 2.11) mostrou que o roleteamento causou o refinamento dos grãos próximos à superfície devido à deformação do material.

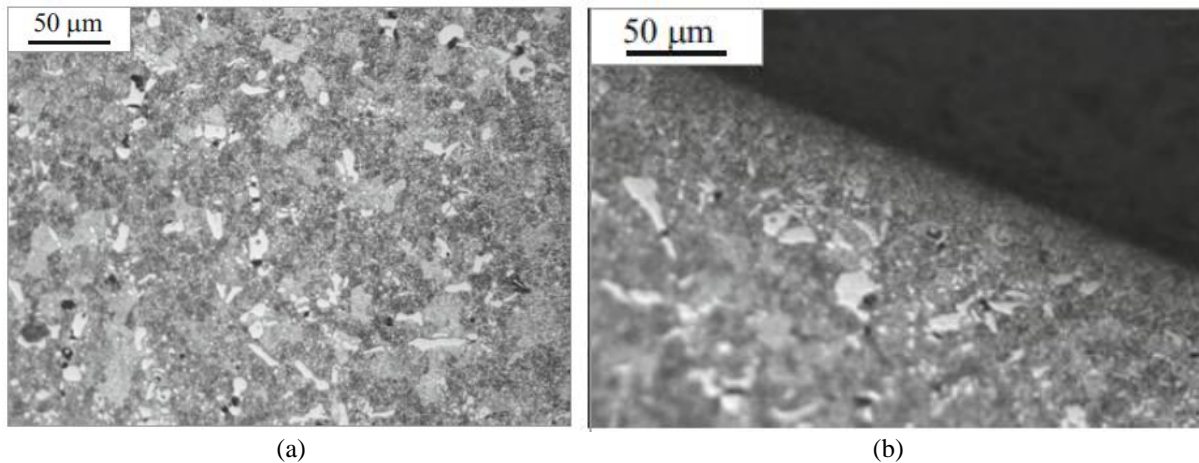


FIGURA 2.11 - Microestrutura do aço AISI D3 após o torneamento (a) e após o roleteamento lubrificado (b) com velocidade de 1,5 m/s, profundidade de penetração de 0,5 mm, esfera de 20 mm por 60 s.

FONTE - AKKURT, 2011, p. 146 e 147.

O trabalho realizado por Łabanowski e Ossowska (2006) com espécimes o aço inoxidável duplex UNS S32550 ($315 \text{ HV}_{0,2}$) mostrou que a profundidade da camada deformada plasticamente aumentou com a elevação da força aplicada durante o roleteamento. O roleteamento do material utilizando as forças de 70, 120 e 160 N promoveu camadas deformadas plasticamente com profundidades iguais a 315, 870 e 1020 μm , respectivamente. Já no estudo de Seemikeri *et al.* (2008), que avaliaram alguns aspectos da integridade superficial de espécimes do aço AISI 1045 submetidos ao roleteamento, identificou-se camadas deformadas plasticamente com profundidades superiores a 1100 μm .

Gharbi *et al.* (2011) estudaram a influência da força de roleteamento sobre a camada subsuperficial de amostras de aço AISI 1010 aplicando-se duas forças diferentes (500 e 600 N) e velocidade e avanço constantes e iguais a 70 m/min e 0,18 mm/rev, respectivamente. A FIGURA 2.12 mostra que o aumento da força de 500 para 600 N provocou um aumento da profundidade da camada deformada de 35 para 50 μm . Além disso, observa-se que, além de uma grande distorção dos grãos, ambas as forças utilizadas foram excessivas e causaram a descamação (*flaking*) da camada subsuperficial, situação que leva à falha de componentes em serviço.

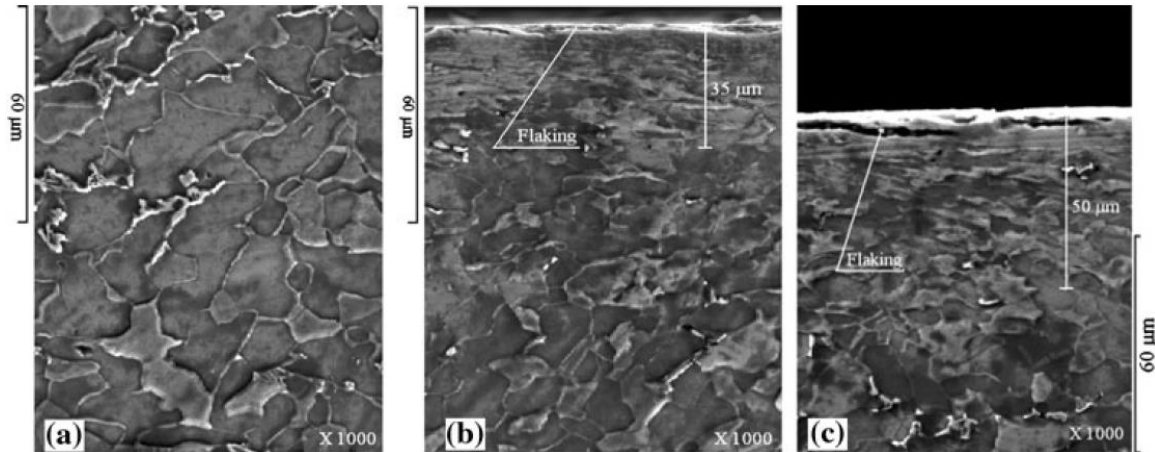


FIGURA 2.12 - Microestrutura da camada subsuperficial de amostras de aço AISI 1010 em três condições diferentes: não roleteada (a), roleteada com força de 500 N, velocidade de 70 m/min e avanço de 0,18 mm/rev (b) e roleteada com força de 600 N e mesma velocidade e avanço (c).

FONTE - GHARBI *et al.*, 2011, p. 909.

No estudo desenvolvido por Blasón *et al.* (2017) com amostras de dois aços-liga de microestrutura composta por ferrita e perlita, um com 0,38% e outro 0,44% de carbono, submetidas ao roleteamento com força de 1500 N, velocidade de 2,22 m/min e doze passes, a análise da camada subsuperficial não indicou a presença de uma distorção pronunciada dos grãos abaixo da superfície do aço com maior quantidade de carbono. Isto indica que a força de roleteamento aplicada não foi suficiente para causar uma deformação plástica considerável na camada subsuperficial desse material, o que pode ser explicado pelo fato dele possuir maior limite de escoamento que o outro (725 contra 529 MPa); a deformação plástica da camada subsuperficial depende da relação entre a força de roleteamento e a dureza ou o limite de escoamento do material que a compõe.

Em seu estudo sobre o roleteamento de superfícies de aço AISI 1045 fresadas, Rodríguez *et al.* (2011) verificaram que a camada subsuperficial alterada se tornou mais profunda com o aumento da pressão. Na FIGURA 2.13 são mostradas imagens da microestrutura das camadas subsuperficiais de um espécime que foi apenas usinado e de um roleteado com pressão de 10 MPa. Verificou-se que o espécime roleteado apresentou uma camada subsuperficial deformada de aproximadamente 10 µm de espessura.

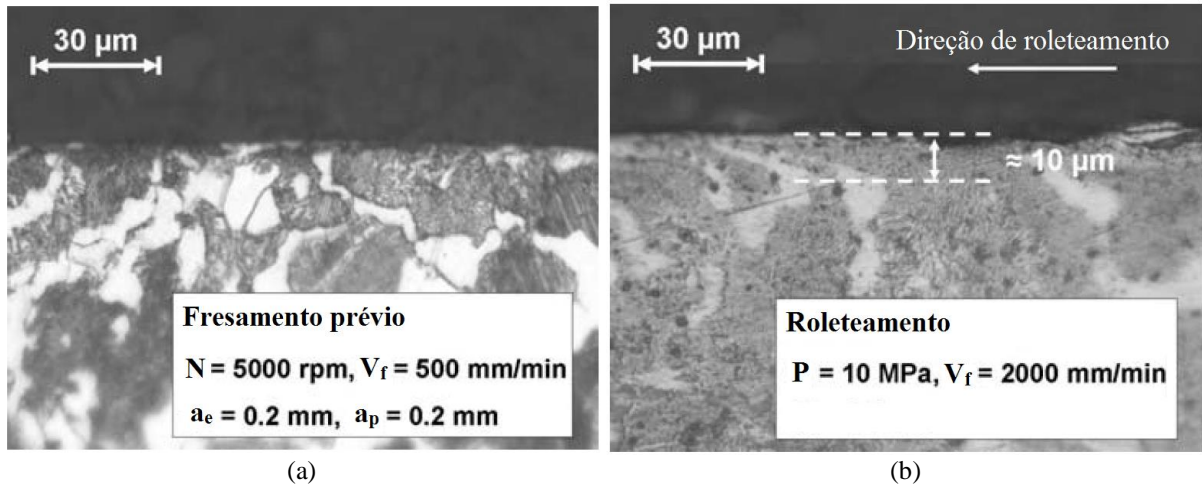


FIGURA 2.13 - Microestrutura da camada subsuperficial de espécimes de aço AISI 1045 nas condi es apenas fresado (a) e roleteado (b).

FONTES - RODRÍGUEZ *et al.*, 2011, p. 231.

Prabhu *et al.* (2014) realizaram a análise das camadas subsuperficiais de corpos de prova de aço AISI 4140 torneados e roleteados e a FIGURA 2.14 apresenta as imagens da microestrutura da camada subsuperficial de corpos de prova apenas torneado e roleteado com força de 750 N, onde se verifica a deforma o e o refinamento dos grãos. Na FIGURA 2.14(b) constata-se que   medida que se aumenta a profundidade da superfície, a quantidade de grãos refinados   reduzida, isto   esperado já que a deforma o plástica induzida pelo roleteamento diminui com a distância da superfície em dire o ao interior do material. Além disso, verificou-se visualmente que a região deformada atingiu a profundidade aproximada de 300 μm , valor que está de acordo com a espessura da região encruada estimada por Prabhu *et al.* (2014) pela medi o da microdureza abaixo da superfície.

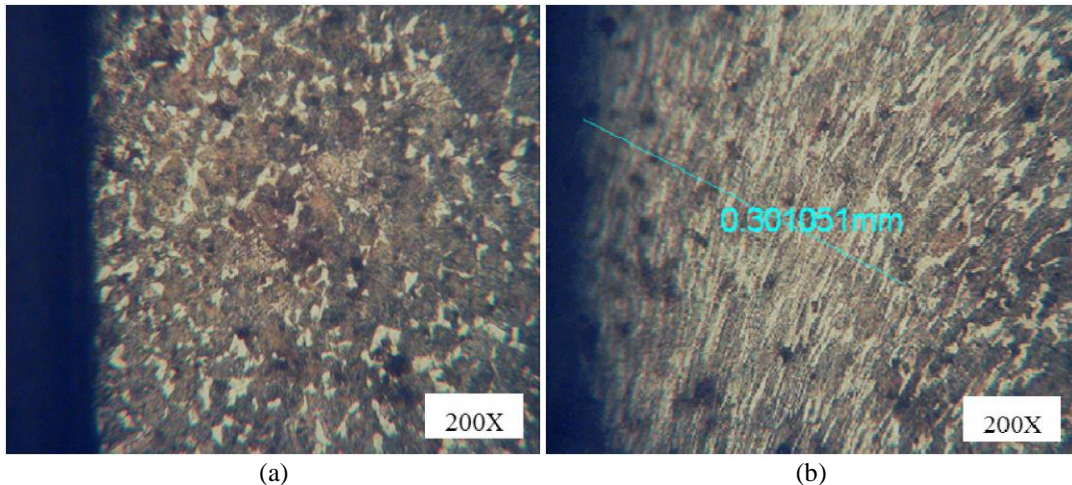


FIGURA 2.14 - Microestruturas da camada subsuperficial de um corpo de prova de aço AISI 4140 apenas torneado (a) e de um roleteado com força de 750 N (b).

FONTE - PRABHU *et al.*, 2014, p. 249.

2.2.2.2 Alterações metalúrgicas

As propriedades de muitos materiais, sejam elas mecânicas ou não, dependem da sua microestrutura, que frequentemente é alterada como resultado de transformações metalúrgicas causadas por temperatura e altas pressões de contato (ASTAKHOV *et al.*, 2010; CALLISTER, 2001). Durante o roleteamento de aços, a pressão Hertziana no contato entre a esfera e a peça pode causar também transformações de fase e estruturas em nanoescala em função da grande quantidade de defeitos cristalinos criados pela deformação plástica, que podem afetar as propriedades mecânicas do material (SAUVAGE *et al.*, 2010; SCHULZE, 2006). A formação de grãos nanométricos (menor que 100 nm) na camada subsuperficial, por exemplo, causa seu endurecimento de acordo com a lei de Hall-Petch (KUZNETSOV *et al.*, 2015; UMEMOTO *et al.*, 2003).

Em aços perlíticos, grandes deformações podem dissolver as lamelas de cementita (Fe_3C) e, com isso, modificar as interfaces entre ferrita e cementita e a espessura da cada fase, fatores que desempenham um papel crítico no comportamento mecânico do material (CALLISTER, 2001; SAUVAGE *et al.*, 2010). A perlita fina, por exemplo, tem maior dureza e resistência mecânica que a perlita grossa e as razões para este comportamento se relacionam aos fenômenos que ocorrem nos contornos das fases ferrita e cementita (CALLISTER, 2001). Além disso, contornos de fase servem como barreiras ao movimento de deslocações de forma muito parecida com que é observado com os contornos de grão e na perlita fina existem mais contornos de fase pelos quais as deslocações precisam passar durante a deformação plástica.

A camada branca (*white etching layer*) é uma camada de material severamente deformada comumente observada em trilhos e rodas ferroviárias como resultado da alta pressão de contato e que não reage quimicamente quando atacada com Nital (LOJKOWSKI *et al.*, 2001; SAUVAGE *et al.*, 2010). Segundo Sauvage *et al.* (2010), o mecanismo de formação desta fase a partir de uma matriz perlítica tem intrigado metalurgistas há muito tempo, já que ela exhibe características de martensita produzida por têmpera, mas sua formação não envolve austenitização prévia. No estudo de Zhang *et al.* (2006) foi verificado que amostras de aço perlítico retiradas de trilhos ferroviários apresentaram na região mais externa uma camada branca com espessura aproximada de 30 μm . Os resultados experimentais mostraram que essa camada branca é composta, em grande parte, por uma microestrutura nanocristalina com partículas de austenita e cementita e regiões de perlita deformada (ferrita altamente deformada e cementita fragmentada). Além disso, ao longo da camada branca foi observada uma uniformidade na distribuição de carbono e uma tetragonalidade dos nanocristais que sugerem que a cementita foi decomposta e que o carbono foi dissolvido na ferrita, formando martensita nanocristalina. Segundo Zhang *et al.* (2006), a presença de austenita poderia indicar que a fase martensítica é formada por um processo de resfriamento rápido da austenita após um aumento de temperatura local, porém isso ocorreria após apenas um ciclo de deformação, não necessitando de ciclos repetidos como é observado em casos reais. Isto indica que a nanocristalização e a austenitização observadas estão relacionadas à deformação plástica severa repetida. A microdureza da camada branca mostrou um valor similar ao observado por Umemoto *et al.* (2003) na superfície de um aço perlítico após o jateamento de granalha (cerca de 8,7 GPa).

No trabalho realizado por Umemoto *et al.* (2003), o jateamento com granalha de um espécime de aço eutetóide com estrutura esferoidita produziu uma camada nanocristalina próxima à superfície cuja área ocupada aumentou com a duração do processo e na qual as partículas de cementita não ficaram mais visíveis, indicando a sua dissolução. Além disso, esse estudo observou a formação de uma região nanocristalina na camada subsuperficial de uma amostra de aço com 3,29% de silício após o jateamento com granalha. Como o aço-silício utilizado mantém sua estrutura cúbica de corpo centrado estável até seu ponto de fusão, a formação da camada nanocristalina não está associada à martensita termicamente induzida. Umemoto *et al.* (2003) informam que o fator mais importante para a produção de uma estrutura nanocristalina é a quantidade de deformação imposta ao material e que as condições favoráveis são alta taxa de deformação a baixa temperatura, deformação cíclica, deformação multidirecional, impurezas e/ou elementos de liga, segunda fase e pressão hidrostática.

A avaliação da camada branca em trilhos ferroviários de aço (1% Mn; 0,6% C; 0,1% Si) realizada por Newcomb e Stobbs (1984) indica que ela tem todas as características de uma estrutura martensítica com carbono em solução. Segundo os autores, a austenitização da superfície ou da camada subsuperficial sob condições normais é extremamente improvável e, mesmo que pudesse ocorrer, algumas características da camada branca não são consistentes com o ciclo repetido de aquecimento a tal temperatura em cada contato com as rodas, sendo improvável a completa dissolução de carbonetos a uma profundidade abaixo da estrutura perlítica. Newcomb e Stobbs (1984) afirmam que a redistribuição de carbono é uma explicação mais natural para o desenvolvimento progressivo da camada branca e para o contorno relativamente nítido com a perlita; a camada branca é provavelmente composta de ferrita com deslocamentos supersaturadas com carbono transferido de carbonetos durante a deformação.

As observações da camada subsuperficial de trilhos ferroviários de aço UIC 860 900A feitas por Lojkowski *et al.* (2001) mostraram que a camada branca desenvolvida durante o serviço é formada por uma microestrutura não uniforme de grãos refinados (25 a 500 nm) e contornos irregulares, onde não foram observadas lamelas de cementita e foi notada a dissolução de carbono na matriz de ferro. Lojkowski *et al.* (2001) afirmam que a alta deformação plástica provoca a dissolução da cementita e a formação da nanoestrutura, sendo que a instabilidade da cementita pode estar relacionada às deslocamentos nas suas interfaces com a ferrita e que a nanoestrutura é uma evidência de alta deformação em baixa temperatura. Assim, atingir a austenitização seria contraditório à sua formação.

Em relação à dissolução de cementita como resultado da deformação plástica, Gavriljuk (2003) mostrou que o aquecimento de um aço com 0,7% de carbono trefilado a frio com 80% de redução de área de seção transversal a temperaturas entre 550 e 600°C provoca uma redução da magnetização medida no material em temperatura ambiente, o que sugere que a deformação plástica causou a modificação da razão entre as frações de cementita e ferrita e a decomposição da fase cementita em aços perlíticos. Além disso, avaliando-se a decomposição de cementita em amostras de aços com 0,8% de carbono laminadas a frio com 91,5% de redução de espessura, Gavriljuk (2003) verificou que o refinamento da estrutura perlítica, aumentando a área interfacial entre a ferrita e a cementita, promove maior decomposição de cementita pelo trabalho a frio.

O roleteamento a seco de amostras cementadas de aço DIN 20Cr4 realizado por Kuznetsov *et al.* (2015) provocou a alteração da camada subsuperficial (FIGURA 2.15), onde

se verifica que as agulhas de martensita foram substituídas por uma microestrutura nanocristalina induzida por deformação.

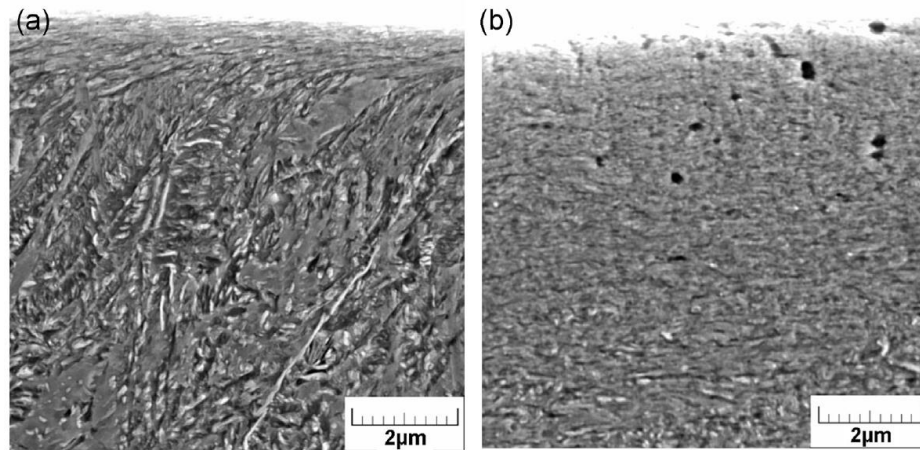


FIGURA 2.15 - Camada subsuperficial de amostras do aço DIN 20Cr4 após o torneamento (a) com velocidade e avanço iguais a 80 m/min e 0,06 mm/rev, respectivamente, e após o roleteamento (b) com quatro passes e força, avanço e velocidade iguais a 200 N, 0,04 mm/rev, 10 m/min, respectivamente.

FONTE - KUZNETSOV *et al.*, 2015, p. 331.

Os resultados da metalografia realizada por Klocke e Liermann (1998) na seção transversal após o roleteamento de amostras de aço DIN 100Cr6 (62 HRC) torneadas com ferramentas com diferentes níveis de desgaste de flanco não indicaram nenhuma diferença nas estruturas da camada subsuperficial antes e após o roleteamento realizado com velocidade, avanço e pressão de 120 m/min, 0,08 mm/rev e 400 bar, respectivamente. A camada branca observada após o torneamento se manteve presente como uma camada uniforme mesmo após o roleteamento.

No estudo realizado por Altenberger *et al.* (1999) com espécimes de aço inoxidável austenítico AISI 304 tratados em solução e temperados foi observado que as camadas nanocristalinas, o aumento da densidade de deslocamentos e a formação de martensita induzida por roleteamento e jateamento de granalha na microestrutura dificultam o movimento de deslocamentos e a formação de bandas de escorregamento durante o processo de fadiga. Dessa forma, geralmente, espécimes cuja superfície foi tratada por esses processos exibem menores amplitudes de deformação plástica em ensaios de fadiga controlados por tensão do que espécimes não tratados, o que leva a melhorias significativas da vida em fadiga sob todas as amplitudes de tensão impostas. Além disso, foi constatado por Altenberger *et al.* (1999) que os espécimes roleteados exibiram menores amplitudes de deformação plástica do

que os jateados e assim vidas em fadiga mais longas, o que pode ser atribuído à camada mais espessa de material encruado e transformado em martensita, já que as alterações microestruturais induzidas por jateamento de granalha e roleteamento foram qualitativamente idênticas.

2.2.2.3 Variação de dureza

A composição química, a estrutura metalográfica e, especialmente, o teor de carbono determinam a dureza do aço que, por sua vez, pode ser aumentada por tratamentos térmicos e mecânicos (BRINKSMEIER *et al.*, 1984). Nos tratamentos mecânicos superficiais, normalmente, quanto maior a ductilidade do material trabalhado e o grau de encruamento, mais profunda é a camada encruada e maior é a sua dureza, respectivamente (ASTAKHOV *et al.*, 2010). Entretanto, o amaciamento da superfície ou da camada subsuperficial também pode ser observado, ocorrendo, particularmente, em materiais muito duros (ALTENBERGER, 2005; SCHULZE, 2006). Além disso, sabe-se que a máxima dureza resultante do roleteamento não é na superfície de trabalho, mas abaixo dela, onde a tensão Hertziana atinge seu máximo (ABRÃO *et al.*, 2014a).

No estudo de Abrão *et al.* (2014a) com espécimes do aço AISI 1060, notou-se que, em geral, a dureza superficial aumentou com a elevação da pressão e do número de passes de roleteamento (FIGURA 2.16) devido ao aumento do grau de encruamento da superfície. Porém, certas condições contrariaram essa observação, o que, segundo Abrão *et al.* (2014a), pode estar associado a uma maior uniformização das deslocções induzidas previamente pelo torneamento. Os perfis de microdureza apresentados na FIGURA 2.16 mostram que a microdureza abaixo da superfície e a profundidade afetada também aumentam com a pressão e o número de passes. Entretanto, quanto maior a dureza superficial inicial, relacionada ao tratamento térmico utilizado, menor é a influência da pressão e do número de passes sobre a dureza final da superfície e abaixo dela.

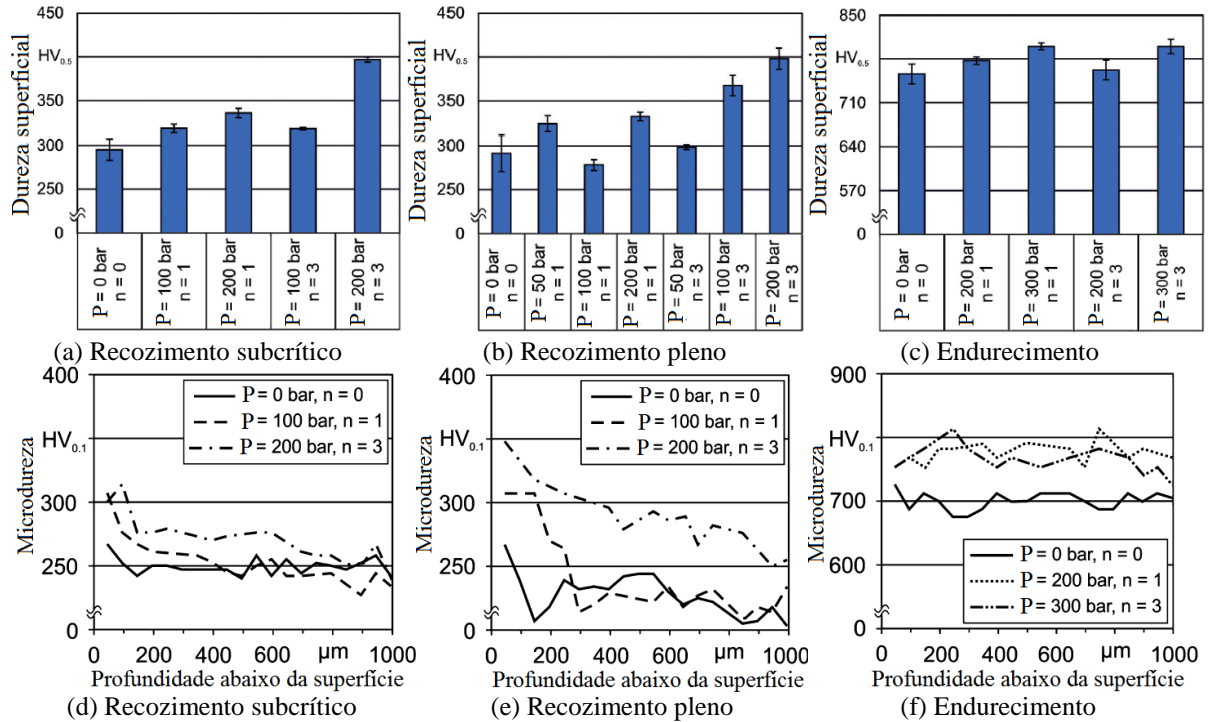


FIGURA 2.16 - Efeito da pressão (P) e do número de passes (n) de roleteamento sobre a dureza superficial (a, b e c) e o perfil de microdureza subsuperficial (d, e e f) de corpos de prova de aço AISI 1060 submetidos à recozimento subcrítico, recozimento pleno e endurecimento por têmpera e revenimento, respectivamente.

FONTE - Adaptado de ABRÃO *et al.*, 2014a, p. 3028.

No trabalho realizado por El-Axir (2000) com o aço de baixo carbono Steel-37 (220 HV), constatou-se que há uma interação significativa do avanço e do número de passes com a velocidade, e do número de passes com a força em relação à microdureza superficial resultante do roleteamento. Em geral, o aumento da velocidade de 9,27 para 46,34 m/min levou a um aumento da microdureza superficial: com três passes e força e avanço iguais a 150 N e 0,20 mm/rev, respectivamente, a microdureza superficial foi de 260 para 304 HV; para valores superiores a 46,34 m/min, porém, esta microdureza foi reduzida (com 83,41 m/min ela foi para 285 HV). Além disso, verificou-se que, entre 50 e 450 N, o aumento da força elevou a microdureza superficial devido ao aumento da deformação plástica e do encruamento da superfície; com três passes, avanço de 0,20 mm/rev e velocidade de 46,34 m/min, o aumento de 150 para 450 N fez com que microdureza superficial fosse de 304 para 343 HV. Em relação ao avanço, constatou-se que sob velocidades acima de 37,07 m/min é melhor utilizar um baixo avanço, pois neste caso a deformação plástica é maior. Por outro lado, sob velocidades abaixo de 37,07 m/min, o aumento do avanço produziu maior microdureza. A influência do número de passes foi uma das mais significativas: em geral, entre um e cinco

passes, o seu aumento elevou a microdureza superficial, isto sendo mais pronunciado sob velocidades mais altas (acima de 27,80 m/min) e forças mais baixas (abaixo de 350 N).

Morimoto (1988) avaliou a dureza da superfície e da camada subsuperficial de uma amostra de aço baixo carbono JIS-S38C recozido após algumas condições de roleteamento e, conforme mostrado na FIGURA 2.17(a), o aumento da força de 60 a 137 N levou a um aumento da dureza superficial, alcançando uma elevação de mais de 50% em relação à dureza da superfície apenas torneada. A FIGURA 2.17(b) mostra que a utilização de um, dois ou três passes fez com que a dureza da superfície sofresse um aumento de 35%, 40% e 45%, respectivamente, em relação à da superfície apenas torneada. Além disso, a FIGURA 2.17(c) mostra que a dureza superficial aumentou com a redução do avanço de 0,1 para 0,0125 mm/rev. Segundo Morimoto (1988), com a redução do avanço, o material é repetidamente sujeito a deformação plástica, causando mais encruamento e maior dureza. O efeito da redução do avanço se mostrou muito similar ao do aumento do número de passes.

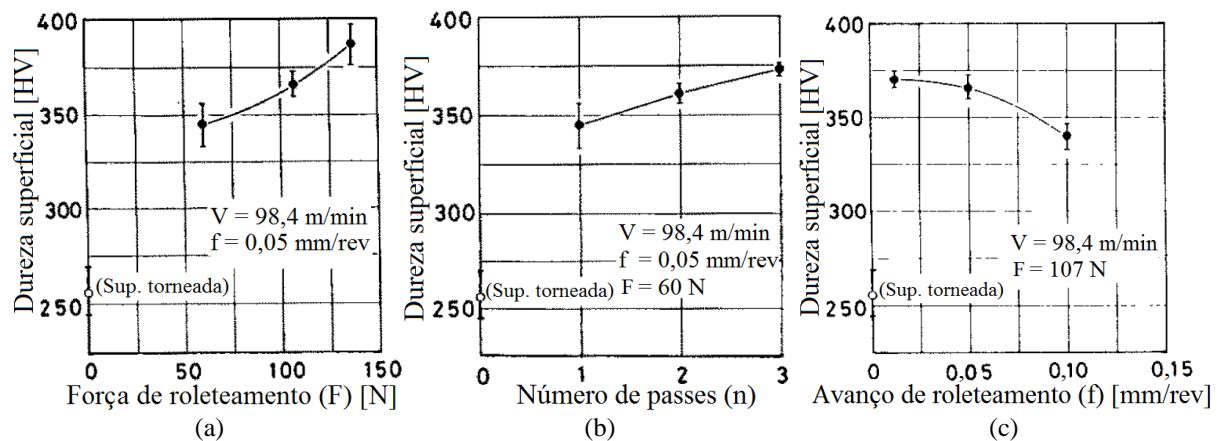


FIGURA 2.17 - Efeito da força (a), do número de passes (b) e do avanço (c) de roleteamento sobre a dureza superficial de uma amostra de aço JIS-S38C.

FONTE - Adaptado de MORIMOTO, 1988, p. 153.

Em relação ao perfil de dureza abaixo da superfície de espécimes de dois aços com resistência à tração iguais a 515 e 2070 MPa submetidos a roleteamento com até três passes, Murthy e Kotiveerachari (1981) verificaram no aço de menor resistência que o número de passes não afetou significativamente os resultados e que no aço de maior resistência uma alteração marcante ocorreu apenas no segundo passe. Além disso, constatou-se que a máxima dureza encontra-se imediatamente abaixo da superfície, pois as tensões Hertzianas durante a operação atingem o máximo abaixo dela.

Rao *et al.* (2008) analisaram o efeito do roleteamento sobre a dureza superficial de um aço de alta resistência e baixa liga (HSLA) bifásico (1,24% Mn; 0,27% Si; 0,15% C) submetido a diferentes temperaturas intercríticas de tratamento térmico. Em qualquer temperatura, o aumento do avanço elevou a dureza superficial até se atingir 0,085 mm/rev, valor a partir do qual a dureza sofreu redução. Segundo Rao *et al.* (2008), sob avanços mais baixos, o número de vezes que a esfera deforma a mesma região é maior e assim a deformação plástica é mais intensa, causando uma maior dureza superficial. Observou-se também que velocidades muito baixas levaram à descamação da superfície e à baixa dureza e que, em velocidades muito altas, o roleteamento foi insuficiente e a dureza resultante também foi baixa. Além disso, a dureza superficial apresentou um aumento com a elevação da força até que o excesso de deformação plástica provocado por forças excessivas levou à ocorrência de descamação das camadas subsuperficiais e a valores mais baixos de dureza superficial.

Os resultados de Łabanowski e Ossowska (2006) mostram que o roleteamento de do aço inoxidável duplex UNS S32550 com a força de 70 N promoveu um aumento da sua dureza de 315 para 442 HV. O aumento da força para 120 N causou um aumento adicional da dureza superficial, atingindo 460 HV e a elevação para 160 N, por sua vez, não provocou nenhuma alteração da dureza superficial. Em relação à distribuição de dureza abaixo da superfície, verificou-se que o aumento da força de 70 até 160 N causou um aumento significativo dos níveis de dureza encontrados, especialmente em profundidades superiores a 200 μm , e que eles se aproximam e se estabilizam em torno da dureza do material bruto à medida que se aumenta a distância da superfície.

O estudo sobre a influência do roleteamento sobre a superfície do aço AISI 1045 realizado por Seemikeri *et al.* (2008) mostrou que a redução da velocidade (de 25,13 para 1,91 m/min), da pressão (de 19,62 para 5,88 bar), do diâmetro da esfera (de 12 para 8 mm) e do número de passes (de dois para um) promove um aumento da dureza superficial da peça. Dentre esses parâmetros, porém, a velocidade se mostrou dominante, seguida da pressão, do diâmetro da esfera e do número de passes, nesta ordem. A dureza superficial antes do roleteamento era de 187 HV e, considerando o resultado das diversas combinações de parâmetros, os valores máximo e mínimo de dureza final medidos nas superfícies roleteadas foram 421 e 240 HV, respectivamente.

O estudo de Gharbi *et al.* (2011) sobre a influência da velocidade (entre 20 e 120 m/min), do avanço (entre 0,1 e 0,42 mm/rev) e da força de roleteamento (entre 200 e 600 N) sobre a dureza superficial de amostras de aço AISI 1010 mostrou uma interação acentuada entre esses fatores. Sob velocidades mais baixas, a dureza superficial sofreu uma redução

significativa com o aumento do avanço, mas aumentou fortemente com o aumento da força, por outro lado, sob velocidades mais altas, o efeito do avanço e da força foi marginal. Em condições de avanço mais baixo, o aumento da velocidade produziu uma redução significativa da dureza superficial, entretanto, com avanços mais altos, a velocidade teve pouco efeito sobre ela. Para a velocidade de 70 m/min, o aumento da força elevou a dureza superficial para qualquer avanço e, para qualquer força, o aumento do avanço até 0,18 mm/rev levou a um pequeno aumento da dureza superficial; em avanços superiores a esse, uma redução significativa da dureza foi observada. Além disso, a influência da velocidade foi muito maior quando se aplicou uma força mais alta; neste caso, o aumento da velocidade reduziu significativamente a dureza superficial, enquanto que, em combinação com forças mais baixas, ocorreu um pequeno aumento da dureza superficial. Segundo Gharbi *et al.* (2011), quando uma força mais alta é aplicada, aumenta-se a quantidade e a profundidade da deformação plástica na camada subsuperficial, aumentando o seu encruamento.

Em relação à dureza superficial obtida após o roleteamento de corpos de prova de aço AISI 1045, Rodríguez *et al.* (2012) constataram que a velocidade e o avanço não apresentaram influência significativa sobre a dureza superficial. Por outro lado, o aumento da pressão provocou um aumento da dureza superficial. Além disso, como mostrado na FIGURA 2.18, a dureza abaixo da superfície e a espessura da região encruada aumentaram com a elevação da pressão; a dureza foi aumentada em até 60%.

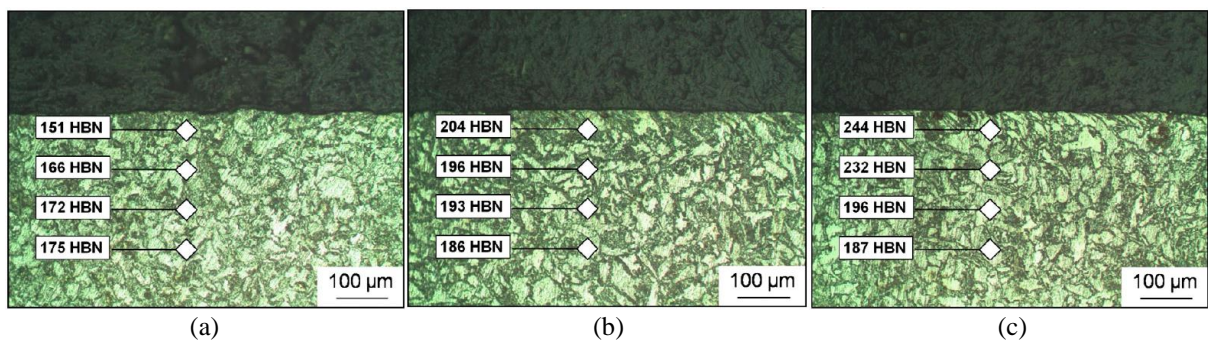


FIGURA 2.18 - Dureza em diferentes profundidades da camada subsuperficial após o torneamento (a) e após o roleteamento com as pressões de 10 MPa (b) e 20 MPa (c).

FONTE - RODRÍGUEZ *et al.*, 2012, p. 2821.

No roleteamento de corpos de prova dos aços AISI 304 e SAE 1045 normalizado com esfera de 6,6 mm de diâmetro e pressão de 150 bar, Juijerm e Altenberger (2007) observaram que, além da indução de tensões residuais compressivas, ocorreu um pronunciado encruamento da camada subsuperficial que resultou em um aumento da dureza das regiões

mais superficiais. As durezas superficiais dos aços AISI 304 e SAE 1045 foram aumentadas em 125 e 50 HV, respectivamente, em comparação com a dureza do material não roleteado. Além disso, foi verificado que a vida em fadiga dos corpos de prova de ambos os materiais foi aumentada como resultado do processo de roleteamento realizado, particularmente na região de alto ciclo.

No trabalho de Rodríguez *et al.* (2011), foram roleteadas superfícies planas fresadas de aço AISI 1045 (250 HBN) para se avaliar a influência da pressão sobre a dureza superficial. Os resultados mostram que a dureza superficial foi elevada à medida que se aumentou a pressão (300, 350 e 400 bar), como resultado do aumento da deformação plástica imposta pelo processo (uma elevação de até 60% foi registrada). Segundo os autores, a pressão é o principal parâmetro relacionado à dureza da superfície roleteada.

Prabhu *et al.* (2014) também verificaram a formação de uma camada de material encruado com o roleteamento de amostras torneadas de aço AISI 4140. O comportamento dos perfis de microdureza se mostrou similar nas duas condições de roleteamento: a dureza diminui progressivamente com o aumento da profundidade devido à redução da quantidade de trabalho a frio sofrida pelo material até se estabilizar na dureza do material inalterado pelo processo. Além disso, os resultados mostram que o aumento da força levou a um aumento do nível de dureza da camada subsuperficial e da profundidade afetada. Baseado na relação de Hall-Petch e na inter-relação próxima entre dureza, limite de escoamento e tensões residuais, Prabhu *et al.* (2014) afirmam que altos valores de dureza frequentemente indicam pequeno tamanho de grão e tensões residuais compressivas de alta intensidade, o que é desejável para a resistência à fadiga.

2.3 Fadiga e tensões residuais

Fadiga se refere à falha ou dano mecânico prematuro localizado e ao processo que leva a ele em um componente sujeito a tensões ou deformações cíclicas inferiores às necessárias para o escoamento plástico e/ou falha por tração (BANNANTINE *et al.*, 1989; COURTNEY, 2005). É costume subdividir o processo de fadiga em três fases ou estágios: nucleação de trinca, propagação ou crescimento de trinca e fratura catastrófica final (ABBASCHIAN *et al.*, 2008).

O escorregamento localizado não homogêneo da microestrutura em nível microscópico é o fator predominante na fadiga em temperatura ambiente, podendo ocorrer mesmo quando a estrutura está solicitada apenas elasticamente em um sentido macroscópico

(ABBASCHIAN *et al.*, 2008; COURTNEY, 2005; LEE *et al.*, 2005). Ele induz dano permanente à estrutura e promove o surgimento de uma pequena trinca que se desenvolve com o aumento do número de ciclos de carregamento, até que a estrutura não seja mais capaz de sustentar a carga solicitante, ocasionando a fratura. As trincas se iniciam no plano de cisalhamento localizado existente em ou próximo de regiões de alta concentração de tensão e/ou de não homogeneidades do material, como bandas de escorregamento persistentes, inclusões ou partículas de segunda fase, porosidades ou descontinuidades, e contornos de grãos e subgrãos. Todos os materiais possuem regiões de não homogeneidade que resultam em “amaciamento” local e/ou falhas que causam concentração de tensão local, levando ao escoamento plástico localizado; o plano de cisalhamento localizado ocorre normalmente na superfície ou em contornos de grão.

No caso em que há escoamento plástico localizado na superfície de metais policristalinos, ocorre a formação de bandas de escorregamento (grupos de linhas de escorregamento), primeiramente, nos cristais cujos planos de escorregamento têm a maior tensão de cisalhamento projetada (ABBASCHIAN *et al.*, 2008). Como a direção da deformação é invertida repetidas vezes no carregamento cíclico, as bandas de escorregamento tendem a se agrupar em pacotes ou estrias, formando bandas de escorregamento persistente. O movimento de deslocações na interseção das bandas de escorregamento com a superfície pode produzir extrusões e intrusões, características superficiais microscópicas que se assemelham a uma trinca ou falha e possuem altura ou profundidade da ordem de 10 μm (ABBASCHIAN *et al.*, 2008; COURTNEY, 2005). A continuação da sollicitação cíclica aumenta essas características até que se forma uma trinca superficial, como mostrado na FIGURA 2.19.

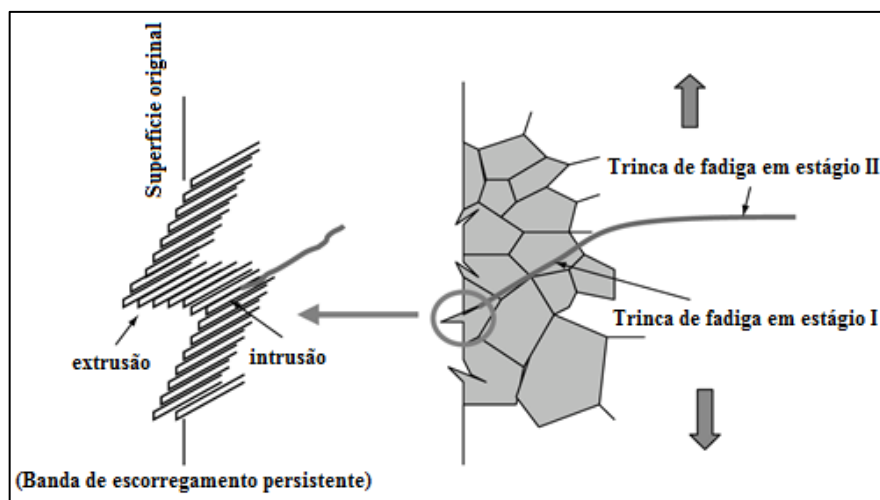


FIGURA 2.19 - Processo de nucleação e propagação inicial de uma trinca superficial.

FONTE - Adaptado de LEE *et al.*, 2005, p.58.

Como as trincas de fadiga se nucleiam quase exclusivamente nas superfícies livres, a nucleação em bandas de escorregamento tem maior importância e a condição superficial se torna crítica (ABBASCHIAN *et al.*, 2008; LEE *et al.*, 2005). Atualmente, os estados de tensão residual e de encruamento ou dureza, a microestrutura e a rugosidade são cruciais para a resistência de fadiga (SCHULZE, 2006). Sulcos, pites, marcas de usinagem e outras irregularidades localizadas nas superfícies atuam como concentradores de tensão, somados aos que já possam existir em sua geometria, e promovem a nucleação de trincas (BANNANTINE *et al.*, 1989; LEE *et al.*, 2005). Dessa forma, um componente com a superfície lisa e polida normalmente exibe vida em fadiga de alto ciclo mais longa. Em fadiga de baixo ciclo, a influência do acabamento superficial sobre a resistência à fadiga é mínima. O endurecimento da superfície e da camada subsuperficial, restringindo sua deformação permanente, é uma forma efetiva de atrasar a nucleação de trincas e, assim, melhorar a sua resistência à fadiga de alto ciclo (COURTNEY, 2005). Isto pode ser alcançado por trabalho a frio e por tratamentos químicos e térmicos (como cementação, nitretação e formação de martensita). O efeito benéfico do trabalho a frio, por sua vez, é limitado, caso o nível de trabalho a frio seja alto demais a camada subsuperficial pode se tornar frágil e fraturar facilmente, criando um grande número de locais para a nucleação de trincas (ŁABANOWSKI; OSSOWSKA, 2006).

Sob a perspectiva das tensões cíclicas aplicadas, o dano por fadiga se correlaciona com a amplitude de tensão e com a tensão normal média, sendo esta responsável pelo estado de abertura ou fechamento das microtrincas e, dessa forma, pela aceleração ou desaceleração da sua nucleação e crescimento (LEE *et al.*, 2005). Sabe-se, no entanto, que a tensão residual presente em uma região da estrutura tem o mesmo efeito que uma tensão normal média de mesma magnitude externamente aplicada a essa região (BANNANTINE *et al.*, 1989). Dessa forma, como a fadiga é um fenômeno superficial, a tensão residual na superfície e na camada subsuperficial é um aspecto crítico e, dentre as características superficiais, ela apresenta o efeito mais significativo no desempenho em fadiga de alto ciclo; nos tratamentos de superfície, a melhoria da vida em fadiga de alto ciclo é causada principalmente pelas tensões residuais compressivas (BANNANTINE *et al.*, 1989; YEN, 2004).

Segundo Altenberger e Scholtes (2000), quase nenhum material, componente ou estrutura pode ser produzido completamente livre de tensões residuais. As tensões residuais estão presentes na superfície e na camada subsuperficial, atingem o máximo próximo à superfície e diminuem com o aumento da profundidade até se anularem (EL-AXIR, 2000;

SARTKULVANICH, 2007). As tensões residuais na usinagem são causadas, principalmente, por deformação plástica não homogênea produzida por efeitos mecânicos, metalúrgicos e térmicos, e por transformação de fase ou microestrutural associada à temperatura e à formação de cavaco; a tensão residual resultante depende do balanço desses fatores e é extremamente difícil prever sua distribuição onde se tem zonas mecanicamente e termicamente afetadas devido ao número de possíveis influências e inter-relações entre elas (ASTAKHOV *et al.*, 2010; YEN, 2004). Tensões residuais de tração surgem quando a ferramenta atua como uma fonte móvel de calor. A alta temperatura leva à expansão da camada de material mais externa enquanto a camada mais interna, que está em uma temperatura consideravelmente menor, é forçada a se deformar plasticamente. Com a redução da temperatura da superfície e a consequente tentativa de contração da camada mais externa, tensão residual de tração é induzida. Por outro lado, quando ocorre deformação plástica, o material ao redor da zona deformada restringe o material deformado plasticamente e tensões elásticas compressivas se concentram abaixo da superfície (AKKURT, 2011; SEEMIKERI *et al.*, 2008).

A tensão residual existente no material pode ser combinada com a tensão normal média imposta externamente sobre ele (BANNANTINE *et al.*, 1989). A FIGURA 2.20 ilustra a influência exercida por tensões residuais compressivas e tensões solicitantes sobre a tensão resultante na superfície e na camada subsuperficial. A tensão residual compressiva faz com que a tensão resultante na superfície superior do componente continue compressiva apesar da tensão solicitante de tração. Para que ocorra falha por fadiga, pelo menos alguma porção da tensão resultante deve estar em tração; um estado de tensão em que a tensão principal máxima é algebricamente negativa (compressiva) não leva à falha por fadiga (COURTNEY, 2005). Trincas existentes ficam “aprisionadas” caso tensões de tração não sejam suficientes para forçar suas pontas a se abrirem (ŁABANOWSKI; OSSOWSKA, 2006).

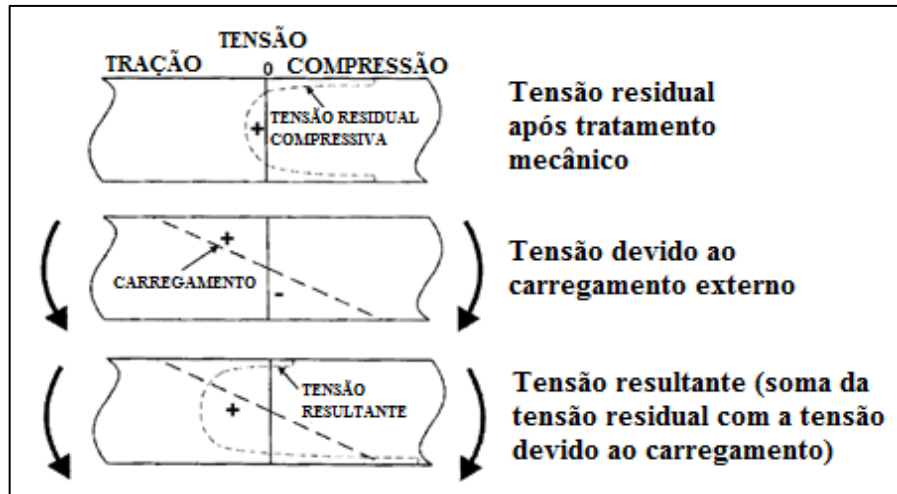


FIGURA 2.20 - Influência da tensão residual sobre a tensão resultante em um componente mecanicamente solicitado.

FONTE - Adaptado de ASTAKHOV *et al.*, 2010, p. 68.

Forjamento, laminação a quente e processos de usinagem (principalmente com ferramentas desgastadas) tendem a induzir tensões residuais de tração na superfície e produzir um acabamento superficial ruim, reduzindo assim a vida em fadiga (LEE *et al.*, 2005; SARTKULVANICH, 2007).

3 METODOLOGIA

A FIGURA 3.1 apresenta a sequência de atividades que foram executadas durante o desenvolvimento deste trabalho. Conforme exposto, após a aquisição dos materiais (aços-carbono ABNT 1020, 1065 e 1080), eles foram submetidos ao tratamento térmico de recozimento pleno para a eliminação dos efeitos de tratamentos térmicos e/ou processamentos prévios e, em seguida, foram usinados na forma desejada para os ensaios de tração e de roleteamento que se seguiram. Os resultados do roleteamento foram, então, avaliados por meio da medição da rugosidade, da microdureza superficial e subsuperficial e da microestrutura da camada subsuperficial dos corpos de prova roleteados. O recozimento dos materiais dos corpos de prova foi realizado no Laboratório de Tratamentos Térmicos do Campus I do CEFET-MG. Todas as atividades de preparação dos corpos de prova, com a exceção da preparação metalográfica, e os ensaios de tração e de roleteamento foram realizados no Laboratório de Usinagem e Automação do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG. As medições de microdureza da superfície e da camada subsuperficial foram realizadas no Laboratório de Metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG. A preparação das superfícies das amostras para a metalografia (lixamento e polimento) foi feita no Laboratório de Materiais, Tribologia e Superfícies do Campus II do CEFET-MG e o ataque químico nas superfícies preparadas para metalografia e as análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas no Centro de Microscopia da UFMG.

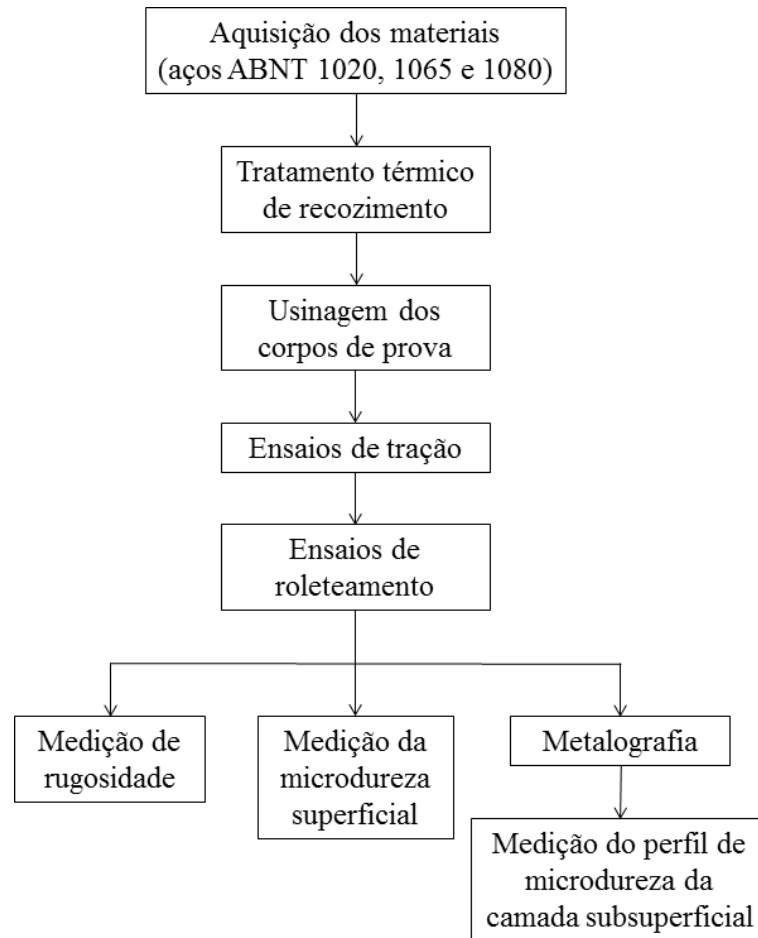


FIGURA 3.1 - Fluxograma do trabalho experimental.

FONTE - Autor.

3.1 Materiais

Para o estudo do processo de roleteamento, trabalhou-se com três materiais que possuem como diferença significativa apenas a concentração de carbono em sua composição química. O carbono é um poderoso constituinte dos aços e são verificadas diferenças significativas na resistência, dureza e ductilidade dos aços com variações relativamente pequenas na concentração de carbono de sua composição (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 2007). Os materiais escolhidos foram os aços-carbono ABNT 1020, 1065 e 1080. Estes três materiais foram adquiridos na forma de barras com diâmetro de 12,7 mm, possuem a microestrutura apresentada na FIGURA 3.2 e a composição química apresentada na TABELA 3.1 conforme os resultados da análise química por espectrometria ótica realizada no SENAI Itaúna (ANEXO A). A composição química de todos os aços utilizados se encontra dentro dos limites estabelecidos pela norma SAE J403:2001 (SAE INTERNATIONAL, 2001 *apud* ARCELORMITTAL, 2013).

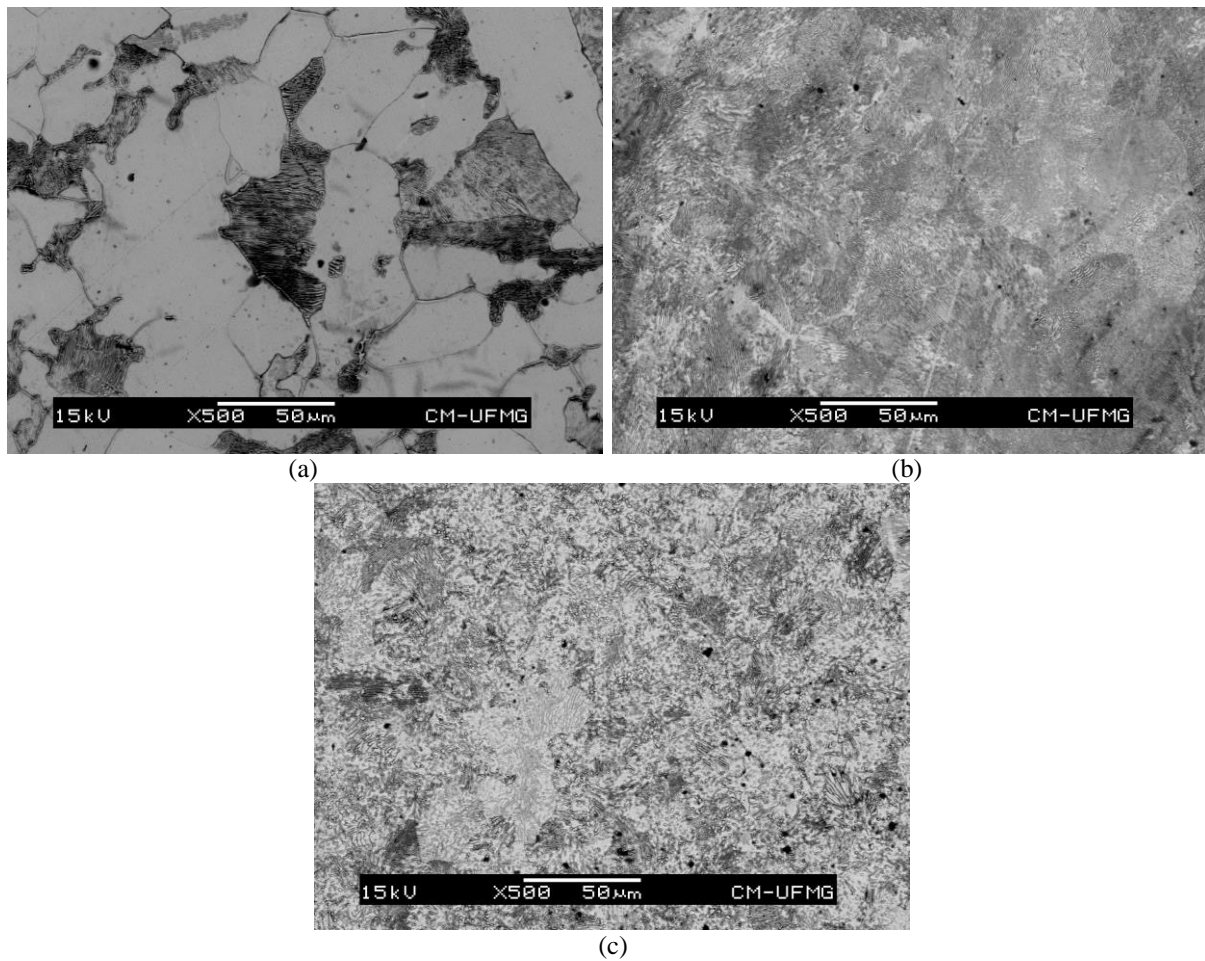


FIGURA 3.2 - Microestrutura inalterada dos aços ABNT 1020 (a), 1065 (b) e 1080 (c).

FONTE - Autor.

TABELA 3.1

Composição química dos aços-carbono utilizados neste trabalho.

	Fe (%)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
Aço ABNT 1020	98,9799	0,2209	0,1349	0,5382	0,0280	0,0056
Aço ABNT 1065	98,1941	0,6352	0,2420	0,7944	0,0206	0,0104
Aço ABNT 1080	97,8418	0,8071	0,2168	0,8185	0,0155	0,0082

FONTE - Autor.

Conforme mostrado na TABELA 3.1 e na FIGURA 3.2(a), o aço ABNT 1020 é hipoeutetóide (concentração de carbono bastante inferior à eutetóide) e, conseqüentemente, sua microestrutura recozida é composta por uma matriz contínua de ferrita pró-eutetóide que envolve colônias isoladas de perlita. Em relação às características mecânicas, o aço ABNT 1020 é um dos aços-carbono mais utilizados na fabricação de peças que recebem tratamento superficial termoquímico para aumento de dureza, principalmente cementação, com ótimo

custo-benefício em relação aos aços mais ligados empregados da mesma forma (AÇOSPORTE, 2018). Além disso, como é um aço com baixo teor de carbono, é altamente tenaz e possui ótima soldabilidade e forjabilidade, porém apresenta baixa resistência mecânica e baixa temperabilidade. O aço ABNT 1020 é utilizado para a fabricação de engrenagens, eixos, virabrequins, eixos-comando, pinos guia, anéis de engrenagem, colunas, catracas, capas, parafusos, pregos, trefilados duros, chassis, discos de roda, componentes de máquinas em geral submetidos a esforços pequenos e médios.

Considerando os dados da TABELA 3.1 e as imagens da microestrutura apresentadas na FIGURA 3.2, pode-se afirmar que o aço ABNT 1065 apresenta em sua microestrutura uma predominância da perlita, com a ferrita pró-eutetóide ainda presente em algumas regiões isoladas, e o aço ABNT 1080, por ser um aço hipereutetóide com composição muito próxima da eutetóide, possui uma microestrutura composta basicamente por perlita com alguma cementita pró-eutetóide. Além disso, a imagem ampliada da microestrutura do aço ABNT 1080 apresentada na FIGURA 3.3, indica que a sua microestrutura perlítica foi parcialmente esferoidizada com o recozimento aplicado a esse material; ao invés de se verificar apenas uma alternância entre ferrita e lamelas de cementita, característica da perlita, são observadas algumas partículas esféricas de cementita embutidas em uma matriz contínua de ferrita (CALLISTER, 2001). Apesar das composições químicas diferentes, os aços ABNT 1065 e 1080 podem ser classificados como aços de alto carbono e possuem aplicações semelhantes. De acordo com Colpaert (2008), aços como ABNT 1050, 1060 e similares são comumente aplicados em implementos agrícolas e ferramentas de moagem, e aços eutetóides e hipereutetóides podem ser utilizados na fabricação de trilhos e rodas ferroviárias. Além disso, segundo Moro (2015), os aços empregados na fabricação de molas possuem teor de carbono acima de 0,5%. O mesmo é corroborado por Fox (1979), segundo o qual os aços utilizados em molas são aços com teor de carbono entre 0,5 e 1,2% e alguns aços-liga.

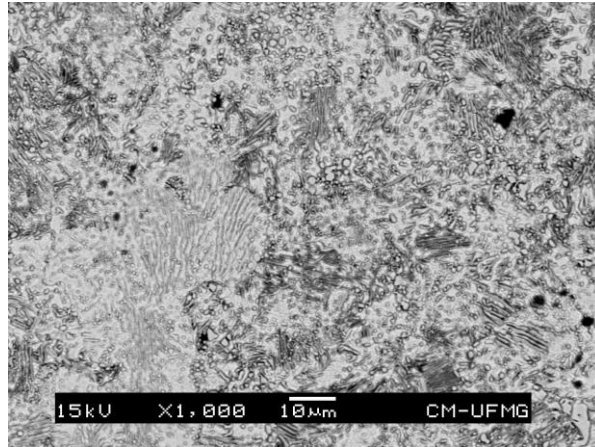


FIGURA 3.3 - Microestrutura do aço ABNT 1080 em que verifica uma esferoidização parcial da perlita.

FONTE - Autor.

A operação de torneamento para a fabricação dos corpos de prova utilizados no roleteamento e nos ensaios de tração a partir das barras cilíndricas foi feita utilizando-se o suporte de torneamento externo Mitsubishi Carbide código ISO SVVCN 2020-K16N e insertos VCMT 160408 UE6110 de metal duro da classe ISO P10 com revestimento de TiCN- Al_2O_3 -Composto de Ti.

Atendendo às exigências do manual da ferramenta de roleteamento, empregou-se como fluido de trabalho do sistema de roleteamento uma solução de água e fluido sintético Petronas Mecafluid S3000 a uma concentração de 10%.

3.2 Equipamentos

Um forno elétrico Magnus modelo N1040 foi utilizado no tratamento térmico de recozimento pleno aplicado aos três aços-carbono antes da usinagem dos corpos de prova.

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de tração e de roleteamento foram usinados em um torno CNC Romi modelo Centur 30S com 5,5 kW de potência e rotação máxima de 3500 rpm.

Os ensaios de tração dos três aços-carbono foram realizados com a máquina de ensaios universal Shimadzu modelo Autograph AG-IS 100 kN, com o sistema de controle e aquisição de dados Trapezium 2 e com a célula de carga SLFL-100 kN.

Para a realização dos experimentos de roleteamento, uma ferramenta de roleteamento Ecoroll modelo HG6-20-003.0-012.5-SL20-R foi acoplada ao mesmo torno CNC empregado na usinagem dos corpos de prova e a pressão de roleteamento foi fornecida

por uma bomba hidráulica Ecoroll modelo HGP 6.0, capaz de bombear fluido com a pressão máxima de 400 bar, alimentada por um reservatório próprio.

Após a realização dos ensaios de roleteamento, realizou-se a medição de rugosidade da superfície roleteada dos corpos de prova utilizando-se o perfilômetro Hommelwerke T8000 com o apalpador TKU300 e a ponta 231289 5/90. Para a varredura da superfície, utilizou-se o *software* Turbo Wave v7.55 e para a análise dos dados coletados foi utilizado o *software* Hommelmap Expert v6.2.

Em seguida, foi feita a medição da microdureza superficial dos corpos de prova utilizando-se um microdurômetro Mitutoyo MVK-H1 com indentador Vickers. Este mesmo equipamento e indentador foram empregados na medição da microdureza da camada subsuperficial de corpos de prova selecionados.

A preparação metalográfica das superfícies das seções dos corpos de prova cortados em 45° com relação eixo longitudinal foi realizada por meio do lixamento e polimento com politrizes metalográficas Teclago modelo PL02E.

A análise microscópica das superfícies das amostras metalográficas para a caracterização do material e estudo da camada subsuperficial foi realizada com um microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL modelo GSM 6260 LV.

3.3 Métodos

A seguir serão descritos os métodos empregados na realização das atividades experimentais desenvolvidas durante este trabalho.

3.3.1 Tratamento térmico

No tratamento térmico de recozimento realizado, as amostras de aço ABNT 1020 foram aquecidas à temperatura de 880°C e as amostras de aço ABNT 1065 e 1080 foram aquecidas à temperatura de 760°C e, em seguida, todas as amostras foram mantidas na temperatura determinada por três horas. Após esse período, o forno foi desligado e ocorreu o resfriamento do material com o forno ainda fechado até a temperatura ambiente, quando então as amostras foram retiradas.

3.3.2 Usinagem dos corpos de prova

Após o recozimento das amostras dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080, elas foram usinadas nas dimensões e geometrias necessárias para os ensaios de tração e de roleteamento apresentadas na TABELA 3.2. Todos os corpos de prova foram torneados na mesma condição: velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem iguais a 79 m/min, 0,15 mm/rev e 0,675 mm, respectivamente. As dimensões dos corpos de prova para o ensaio de tração foram definidas com base nas normas ISO 6892-1:2009 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2009) e DIN 50125:2009 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V., 2009) e nas limitações das garras de tração e da célula de carga da máquina de ensaio. As diferenças observadas no comprimento dos corpos de prova são resultantes das diferenças na quantidade disponível de cada material. O diâmetro dos corpos de prova para roleteamento foi determinado com base na limitação do curso das esferas na ferramenta de roleteamento (de 3 a 12,5 mm) e as demais dimensões foram definidas considerando a quantidade de material disponível.

TABELA 3.2

Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração e de roleteamento.

Material	Corpo de prova para o ensaio de tração	Corpo de prova para o roleteamento
Aço ABNT 1020		
Aços ABNT 1065 e 1080		

FONTE - Autor.

3.3.3 Ensaio de tração

Para cada material, foram realizados três ensaios de tração usando a montagem apresentada na FIGURA 3.4 para a determinação dos limites de escoamento e de resistência à tração e dos coeficientes de encruamento e de resistência, totalizando nove ensaios. Os

ensaios e a análise dos resultados foram feitos de acordo com a metodologia para ensaios de tração com materiais metálicos à temperatura ambiente apresentada pela norma ISO 6892-1:2009 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2009). A velocidade de separação do cabeçote móvel utilizada nos ensaios foi de 0,51 mm/min.

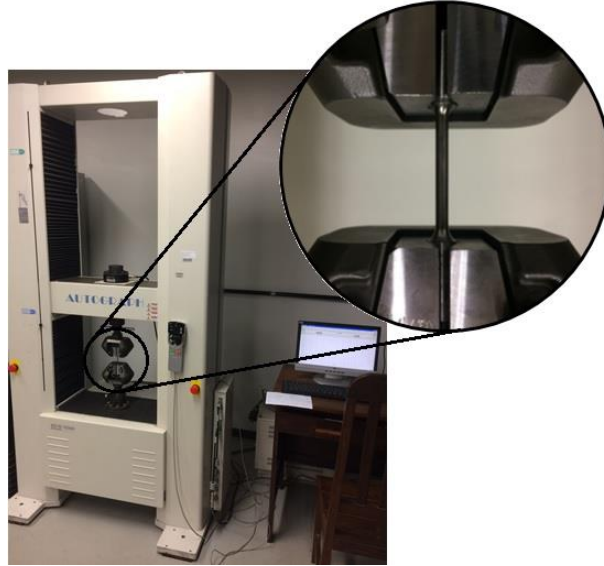


FIGURA 3.4 - Montagem para a realização dos ensaios de tração.
FONTE - Autor.

3.3.4 Roleteamento

A ferramenta de roleteamento utilizada, mostrada na FIGURA 3.5, emprega três esferas cerâmicas com 6 mm de diâmetro defasadas entre si por 120° , cada uma dentro de uma cápsula que as permite girar livremente em qualquer direção. A utilização de três esferas defasadas entre si por 120° permite o roleteamento de componentes esbeltos sem que ocorra qualquer deslocamento ou alteração de forma durante o processo em função da pressão aplicada.



FIGURA 3.5 - Ferramenta empregada nos ensaios de roleteamento.

FONTE - Autor.

Durante a realização dos ensaios de roleteamento, a bomba hidráulica utilizada para a pressurização do fluido de trabalho foi colocada próxima ao torno CNC onde a ferramenta de roleteamento foi acoplada. A montagem da ferramenta e da bomba hidráulica no torno CNC para a realização dos ensaios de roleteamento é mostrada na FIGURA 3.6.

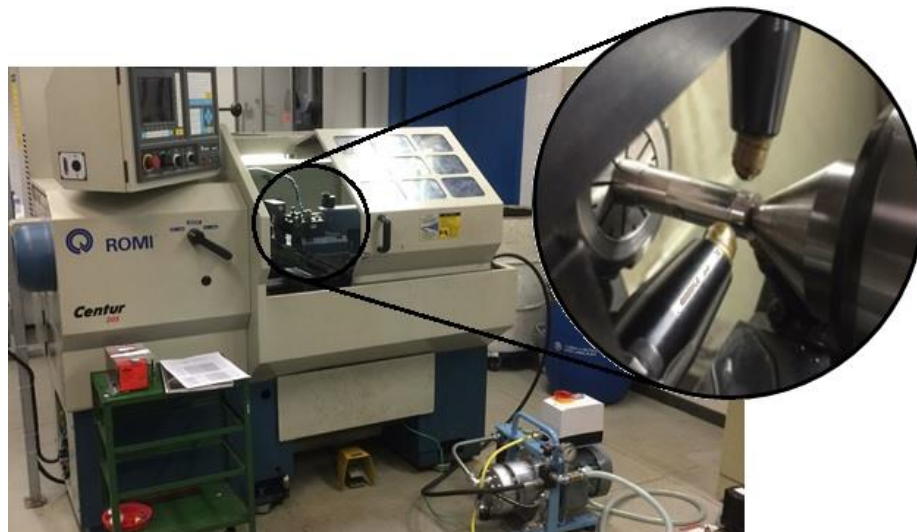


FIGURA 3.6 - Montagem da ferramenta de roleteamento e do seu sistema de pressurização junto ao torno CNC para realização dos ensaios de roleteamento dos corpos de prova.

FONTE - Autor.

O roleteamento foi feito ao longo de uma região dos corpos de prova com 20 mm de comprimento, conforme indicado pelas áreas hachuradas nos desenhos apresentados na FIGURA 3.7.

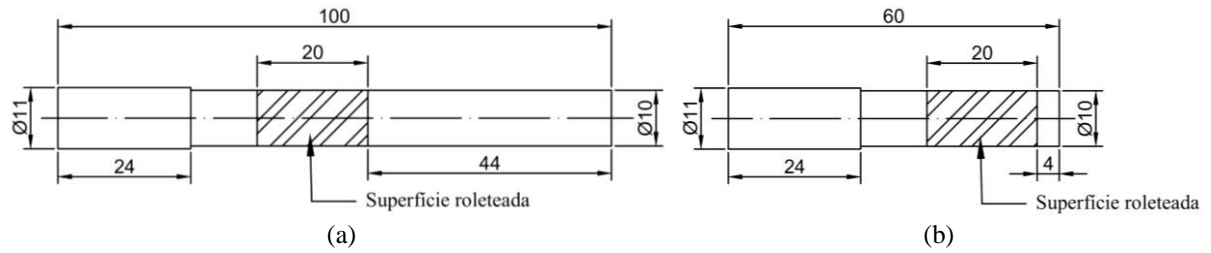


FIGURA 3.7 - Desenhos dos corpos de prova de aço ABNT 1020 (a) e dos aços ABNT 1065 e 1080 (b) com as regiões roleteadas indicadas pelas áreas hachuradas.

FONTE - Autor.

Quatro parâmetros de roleteamento foram variados para o estudo da influência de cada um sobre as variáveis de saída (rugosidade e microdureza das superfícies roleteadas e microestrutura e microdureza da camada subsuperficial). Os parâmetros estudados foram a pressão, a velocidade, o avanço e o número de passes e os valores atribuídos a cada um durante os ensaios estão apresentados na TABELA 3.3.

TABELA 3.3

Parâmetros de roleteamento estudados e os valores atribuídos a cada um durante os ensaios.

Pressão (P) [bar]	Velocidade (V) [m/min]	Avanço (f) [mm/rev]	Número de passes (n)
40	30	0,04	1
80	50	0,08	2
120	70	0,12	3
160	90	0,16	5

FONTE - Autor.

As pressões utilizadas nos experimentos de roleteamento foram escolhidas com base na TABELA 3.4, que apresenta a faixa de pressões recomendadas pelo fabricante do equipamento em função da dureza do componente a ser roleteado. A dureza dos corpos de prova utilizados nos ensaios de roleteamento de cada material foi estimada a partir dos limites de escoamento obtidos dos ensaios de tração e, como todos os valores de dureza estimados dessa forma ficaram abaixo de 200 HV, as pressões selecionadas ficaram dentro do intervalo de 20 a 150 bar, com a exceção da pressão mais alta, que foi escolhida propositalmente acima da recomendação do fabricante. As velocidades utilizadas nos ensaios de roleteamento, por sua vez, foram escolhidas com base na rotação máxima do torno CNC, considerando uma margem de segurança e o diâmetro da seção roleteada dos corpos de prova. Além disso, conforme mostrado na TABELA 3.3, os valores de avanço de roleteamento utilizados foram

inferiores ao avanço de corte empregado no torneamento prévio (0,15 mm/rev), com exceção do mais alto, que foi escolhido propositalmente superior a ele.

TABELA 3.4

Faixa de pressões recomendadas pelo fabricante da ferramenta de roleteamento em função da dureza do componente a ser roleteado.

Dureza do componente	Faixa de pressões recomendadas [bar]
Até 200 HV	20 - 150
Até 450 HV	150 - 250
Até 840 HV	300 - 400

FONTE - Adaptado de ECOROLL, [s.d.], p. 9.

Para cada material, o estudo do efeito dos parâmetros de roleteamento foi feito conforme mostrado na TABELA 3.5, ou seja, variou-se um parâmetro individualmente de acordo com os valores apresentados na TABELA 3.3, enquanto se mantinha constante os outros parâmetros. Como verificado na TABELA 3.5, os valores de base para a pressão, a velocidade, o avanço e o número de passes foram 80 bar, 30 m/min, 0,04 mm/rev e um passe, respectivamente. O método experimental empregado deixa claro, portanto, que, neste estudo, foi avaliada a influência individual dos parâmetros de processo escolhidos, ou seja, não foi considerada a possível interação dos efeitos dos parâmetros sobre os resultados do processo, que exigiria um planejamento fatorial completo. Além disso, considerando o método experimental mostrado na TABELA 3.5, para os três materiais juntos, foi necessário realizar 39 ensaios de roleteamento.

TABELA 3.5
Parâmetros de roleteamento testados.

Efeito da pressão de roleteamento			
Pressão (P) [bar]	Velocidade (V) [m/min]	Avanço (f) [mm/rev]	Número de passes (n)
40	30	0,04	1
80	30	0,04	1
120	30	0,04	1
160	30	0,04	1
Efeito da velocidade de roleteamento			
Pressão (P) [bar]	Velocidade (V) [m/min]	Avanço (f) [mm/rev]	Número de passes (n)
80	30	0,04	1
80	50	0,04	1
80	70	0,04	1
80	90	0,04	1
Efeito do avanço de roleteamento			
Pressão (P) [bar]	Velocidade (V) [m/min]	Avanço (f) [mm/rev]	Número de passes (n)
80	30	0,04	1
80	30	0,08	1
80	30	0,12	1
80	30	0,16	1
Efeito do número de passes de roleteamento			
Pressão (P) [bar]	Velocidade (V) [m/min]	Avanço (f) [mm/rev]	Número de passes (n)
80	30	0,04	1
80	30	0,04	2
80	30	0,04	3
80	30	0,04	5

FONTE - Autor.

3.3.5 Medição da rugosidade superficial

A FIGURA 3.8 mostra o equipamento e a montagem empregada na medição de parâmetros de rugosidade na superfície dos corpos de prova torneados e roleteados. Dessa forma, além dos 39 corpos de prova roleteados, parâmetros de rugosidade superficial foram medidos em três corpos de prova apenas torneados, um para cada aço utilizado. Em cada corpo de prova, foram realizadas três medições defasadas em 120° ao longo da circunferência.

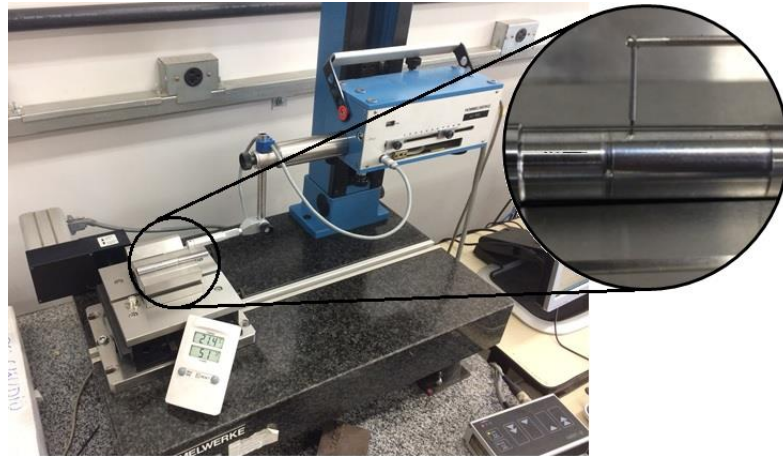


FIGURA 3.8 - Perfilômetro e montagem utilizada para a medição de parâmetros de rugosidade nos corpos de prova roleteados e apenas usinados.

FONTE - Autor.

3.3.6 Microdureza superficial

A FIGURA 3.9 apresenta o equipamento utilizado e uma indentação na superfície dos corpos de prova. A medição da microdureza superficial também foi realizada em três pontos defasados em 120° ao longo da circunferência de cada corpo de prova aplicando-se uma carga de 200 g durante 15 s, seguindo o método padrão para ensaios de dureza Vickers da norma ASTM E384-11:2011 (ASTM INTERNATIONAL, 2011). Nos casos em que foi observada uma dispersão muito grande dos resultados, uma quarta medição foi realizada em uma posição intermediária em relação às outras.

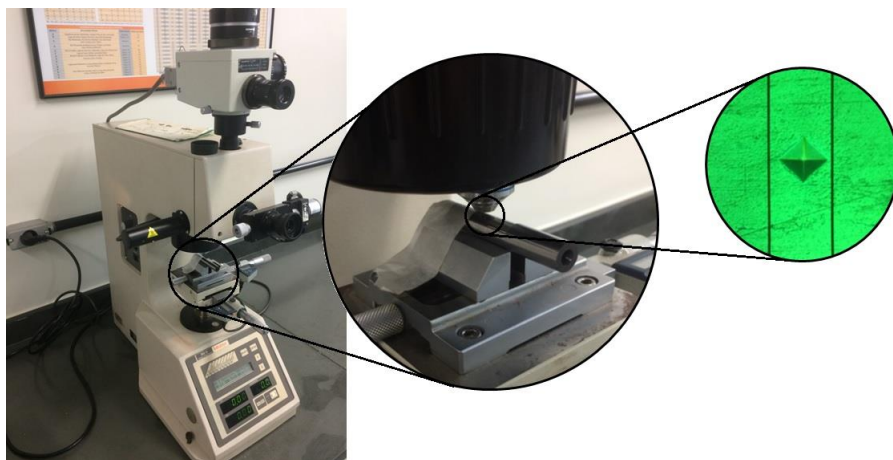


FIGURA 3.9 - Medição da microdureza superficial dos corpos de prova roleteados e apenas torneados.

FONTE - Autor.

A medição da microdureza superficial foi realizada em vez da dureza convencional, pois, conforme verificado na literatura, a alteração provocada pelo roleteamento alcança uma pequena profundidade abaixo da superfície, em torno de 50 a 1000 μm , e, neste caso, apenas a dureza da superfície é de interesse.

3.3.7 Análise metalográfica

Com o objetivo de se avaliar a microestrutura dos três materiais empregados no estudo e a influência dos parâmetros de roleteamento sobre a microestrutura da camada subsuperficial, realizou-se a metalografia dos corpos de prova nas condições de roleteamento selecionadas que são apresentadas na TABELA 3.6, totalizando 18 amostras, considerando os três materiais estudados, sendo que a condição $P = 0$ bar, $V = 0$ m/min, $f = 0$ mm/rev e $n = 0$ corresponde à condição apenas torneada. A avaliação metalográfica, conforme afirmado por Colpaert (2008), é uma importante forma de se caracterizar os metais, especialmente aços e ferros fundidos, mas para que resultados confiáveis e úteis sejam obtidos, são necessários planejamento e execução metódicos.

TABELA 3.6

Condições de roleteamento dos corpos de prova de cada material submetidos à metalografia.

Pressão (P) [bar]	Velocidade (V) [m/min]	Avanço (f) [mm/rev]	Número de passes (n)
0	0	0	0
80	30	0,04	1
160	30	0,04	1
80	90	0,04	1
80	30	0,16	1
80	30	0,04	5

FONTE - Autor.

Para a avaliação metalográfica, realizou-se o corte dos corpos de prova com uma inclinação de 45° em relação ao eixo longitudinal, como ilustrado na FIGURA 3.10. Isto foi feito com o objetivo de facilitar a visualização dos grãos da camada subsuperficial que, conforme verificado na literatura, são achatados em função do roleteamento. Ao cortar os corpos de prova em uma inclinação de 45° , uma área maior desses grãos pode ser visualizada.

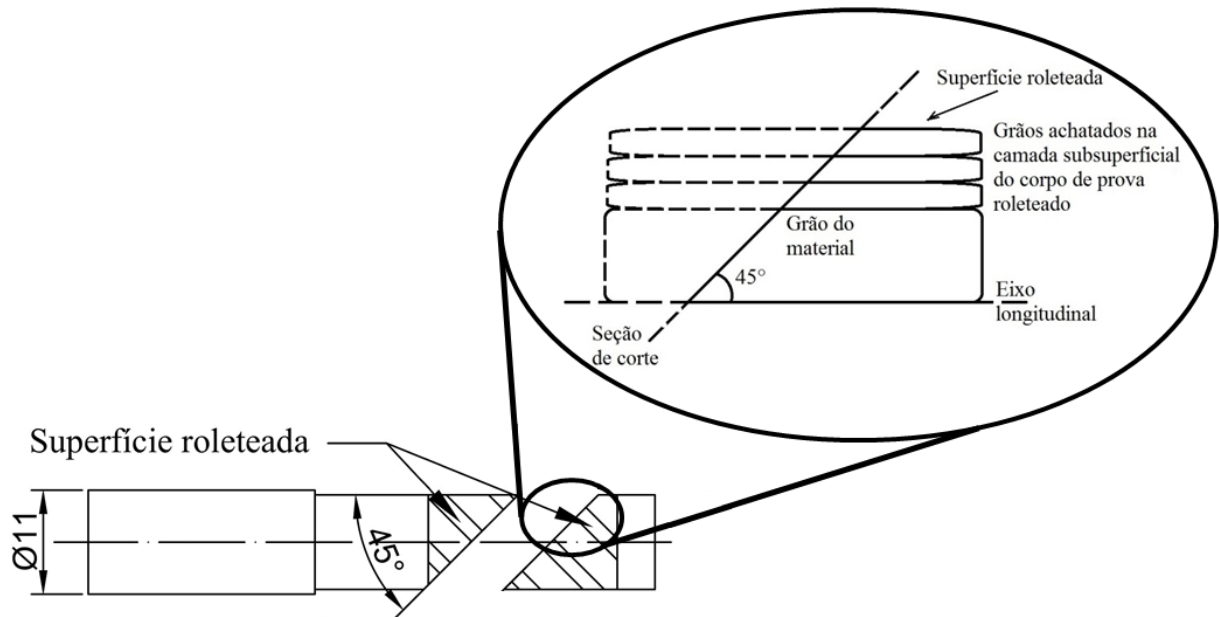


FIGURA 3.10 - Ilustração do corte realizado nos corpos de prova para a visualização da camada subsuperficial roleteada.

FONTE - Autor.

A parte à direita (FIGURA 3.10) dos corpos de prova cortados foi embutida a frio, de forma que a superfície cortada ficasse na superfície da amostra, permitindo sua preparação para a análise metalográfica. A preparação (lixamento e polimento) das superfícies das amostras embutidas foi realizada em politrizes metalográficas. Inicialmente, foi feito o lixamento com lixas de granulometria progressivamente menor (grana de 240, 400, 600 e 1200). Então, as superfícies foram polidas, inicialmente com pasta de diamante com diâmetro médio de 3 μm e, por fim, com solução de alumina com diâmetro médio de 1 μm .

Após a preparação das superfícies das amostras, elas foram atacadas quimicamente com Nital 3% para a revelação dos constituintes da microestrutura e dos contornos de grão, metalizadas com uma fina camada de carbono para se tornarem condutoras e, em seguida, avaliadas com o microscópio eletrônico de varredura (MEV). Utilizou-se o MEV para a avaliação da microestrutura das amostras porque as bordas dos corpos de prova embutidos ficaram abauladas, fazendo com que fosse necessário utilizar um microscópio com maior profundidade de campo para visualizar adequadamente a microestrutura dessa região. O abaulamento das bordas pode ser explicado pela utilização de uma resina de embutimento com resistência mecânica muito baixa. Durante a preparação, lixamento e polimento, a resina cedeu muito facilmente na interseção com os corpos de prova, o que levou a um pequeno degrau e à perda da planicidade da superfície da camada subsuperficial.

3.3.8 Microdureza da camada subsuperficial

É importante salientar que não apenas as propriedades do material próximo da superfície, mas também suas distribuições dentro da camada subsuperficial afetada são de interesse no estudo do processo de roleteamento. Dessa forma, o mesmo equipamento utilizado na medição da microdureza superficial dos corpos de prova foi utilizado para a determinação do perfil de microdureza da camada subsuperficial dos corpos de prova selecionados para a avaliação metalográfica (TABELA 3.6). Para isto, foi feita a medição da microdureza em diferentes profundidades da camada subsuperficial, como mostrado na FIGURA 3.11(a).

Da mesma forma que na medição da microdureza superficial, em cada medição aplicou-se a carga de 200 g por um período de 15 s, seguindo a recomendação da norma ASTM E384-11:2011 (ASTM INTERNATIONAL, 2011), que apresenta o método padrão para a medição de dureza Vickers. O espaçamento utilizado entre a indentação e o contorno da superfície e entre as indentações ao longo da camada subsuperficial também seguiu a recomendação da mesma norma e ilustrada na FIGURA 3.11(b) para que não houvesse interferência da borda e de outras indentações em cada medição (onde dV é a diagonal da indentação). Além disso, como a seção cortada para a avaliação metalográfica possui inclinação de 45° em relação à seção transversal dos corpos de prova, a posição de cada medição foi posteriormente convertida para obtenção de sua posição equivalente na seção transversal dos corpos de prova.

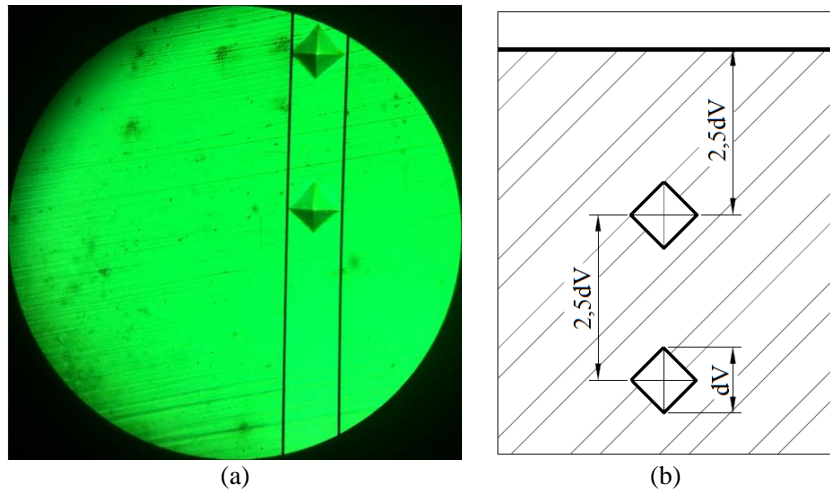


FIGURA 3.11 - Medições realizadas na camada subsuperficial de um corpo de prova (a) e espaçamento mínimo entre a indentação e o contorno da superfície e entre indentações segundo a norma ASTM E384-11:2011 (ASTM INTERNATIONAL, 2011) (b).

FONTE - Autor.

Como verificado na literatura, a profundidade da camada subsuperficial alterada na seção transversal de corpos de prova em função do roleteamento normalmente atinge entre 50 e 1000 μm , assim, o número de medições de microdureza foi escolhido de forma que uma profundidade mínima de 1,2 mm fosse coberta pelas medições em todos os corpos de prova.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos dos ensaios de tração e da medição da rugosidade e da microdureza superficial e subsuperficial de corpos de prova em diferentes condições de roleteamento e, por fim, será feita uma análise da influência deste processo sobre a microestrutura da camada subsuperficial de determinados corpos de prova.

4.1 Ensaio de tração

Os resultados dos ensaios de tração realizados com os corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080 estão apresentados na FIGURA 4.1 e os valores médios dos limites de escoamento e de resistência à tração e dos coeficientes de encruamento e de resistência estão apresentados na TABELA 4.1. Os menores limites de escoamento e de resistência à tração apresentados pelo aço ABNT 1020 em relação aos demais são esperados, já que este material possui uma quantidade de carbono bastante inferior e, conseqüentemente, é consideravelmente menos resistente à deformação plástica. Seguindo este mesmo raciocínio, porém, não era esperado que os limites de escoamento e de resistência à tração do aço ABNT 1065 fossem comparáveis aos do aço ABNT 1080 já que este possui concentração de carbono superior àquele. De acordo com Bauccio (1993), os limites de escoamento típicos dos aços AISI 1020, 1060 (material muito próximo do aço ABNT 1065) e 1080 na condição recozida são iguais a 294,8, 372,3 e 375,8 MPa, respectivamente, e os limites de resistência à tração típicos são iguais a 394,7, 625,7 e 615,4 MPa, respectivamente. Pode-se concluir, portanto, que os resultados dos ensaios de tração para os limites de escoamento dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080 na condição recozida estão coerentes com a literatura e que tanto o limite de escoamento quanto o de resistência dos aços ABNT 1065 e 1080 são, de fato, muito próximos, assim como observado neste estudo. Além disso, observou-se que os três aços utilizados possuem um limite de resistência à tração cerca de 40% superior ao esperado pela literatura. Em relação aos coeficientes de encruamento e de resistência, pode-se afirmar que os valores encontrados estão de acordo com os valores típicos encontrados em aços e, assim como verificado em Hosford e Caddell (2007) e em Kalpakjian e Schmid (2010): o coeficiente de encruamento apresentou uma tendência de redução com o aumento da

resistência mecânica do material e o coeficiente de resistência mostrou uma tendência de crescimento com a resistência mecânica dos aços.

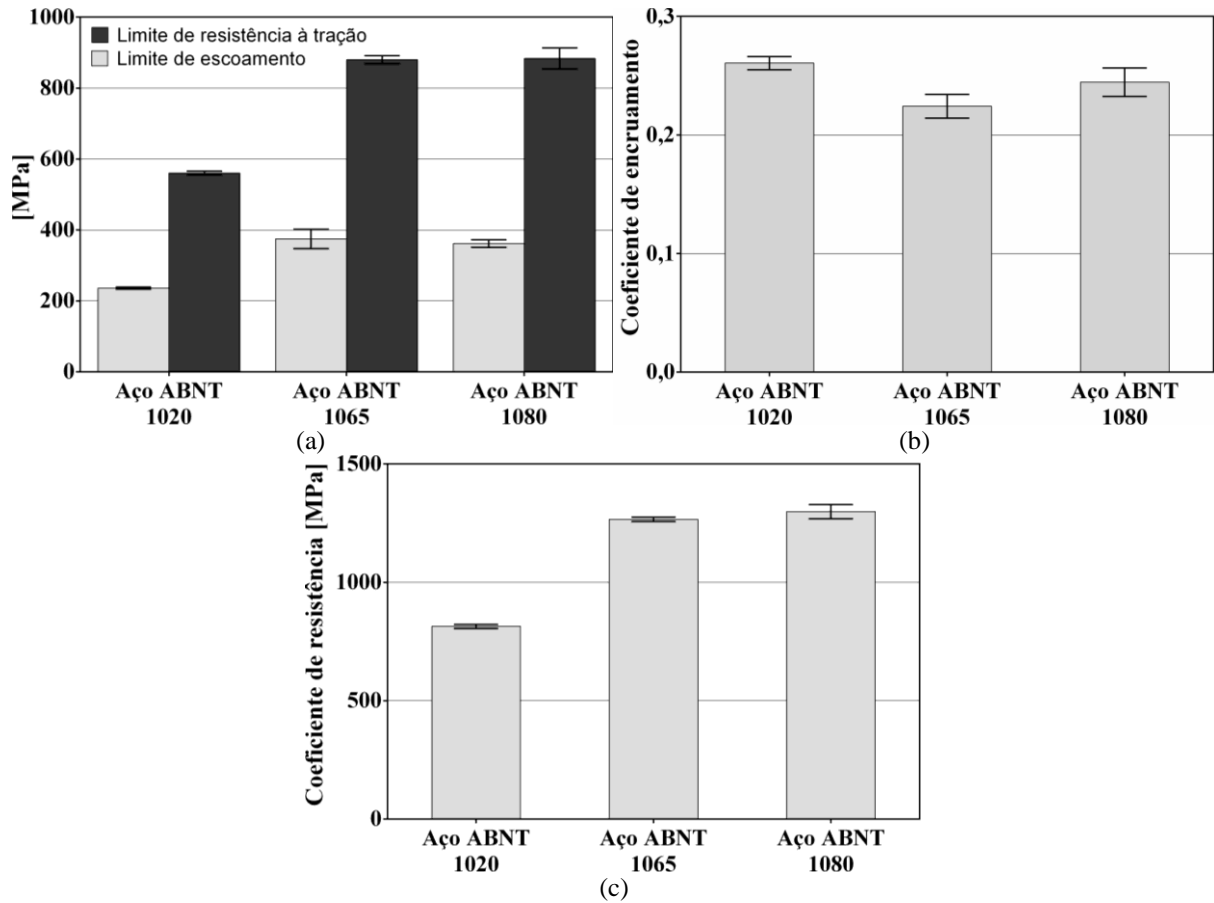


FIGURA 4.1 - Limites de escoamento e de resistência à tração (a) e coeficientes de encruamento (b) e de resistência (c) dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.

FONTE - Autor.

TABELA 4.1

Valores médios dos limites de escoamento e de resistência à tração e dos coeficientes de encruamento e de resistência dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.

	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
Limite de escoamento médio [MPa]	236	375	362
Limite de resistência à tração médio [MPa]	561	880	884
Coeficiente de encruamento médio	0,261	0,224	0,244
Coeficiente de resistência médio [MPa]	814	1266	1299

4.2 Rugosidade superficial

A norma NBR ISO 4287:2002 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002) descreve um número muito grande de parâmetros de rugosidade. Entretanto, a variedade e a quantidade de parâmetros que, algumas vezes, apresentam apenas pequenas diferenças entre si, não estão relacionadas a uma aplicação individual para cada um, mas sim, na maioria dos casos, ao desenvolvimento histórico do tema rugosidade superficial (WHITEHOUSE, 2002). Assim, existem muitos parâmetros redundantes que podem ser omitidos em uma análise de superfície. É inútil, por exemplo, avaliar Ra e Rq em uma análise e deixar de lado outras informações importantes. Portanto, foram selecionados parâmetros de diferentes tipos que se complementam para uma análise adequada da topografia das superfícies dos corpos de prova estudados.

4.2.1 Parâmetros de amplitude

Primeiramente, são apresentados alguns parâmetros de amplitude selecionados que foram divididos em dois grupos: médias das ordenadas e picos e vales, de acordo com a norma NBR ISO 4287:2002 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002).

4.2.1.1 Médias das ordenadas

O desvio médio aritmético (Ra) e o desvio médio quadrático (Rq) são parâmetros de amplitude (médias das ordenadas), conforme a norma NBR ISO 4287:2002 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002). Segundo Whitehouse (2002), Rq está gradualmente substituindo Ra por ser mais facilmente relacionado ao desempenho funcional de componentes em termos de amplitude (médias das ordenadas). Além disso, ambos mostraram o mesmo comportamento nas superfícies estudadas, portanto, decidiu-se analisá-las por meio do parâmetro Rq apenas. A FIGURA 4.2 apresenta o comportamento do Rq das superfícies dos corpos de prova variando-se a pressão, a velocidade, o avanço e o número de passes de roleteamento segundo a TABELA 3.5 e incluindo os dados das superfícies apenas torneadas ($P = 0$ bar, $V = 0$ m/min, $f = 0$ mm/rev e $n = 0$).

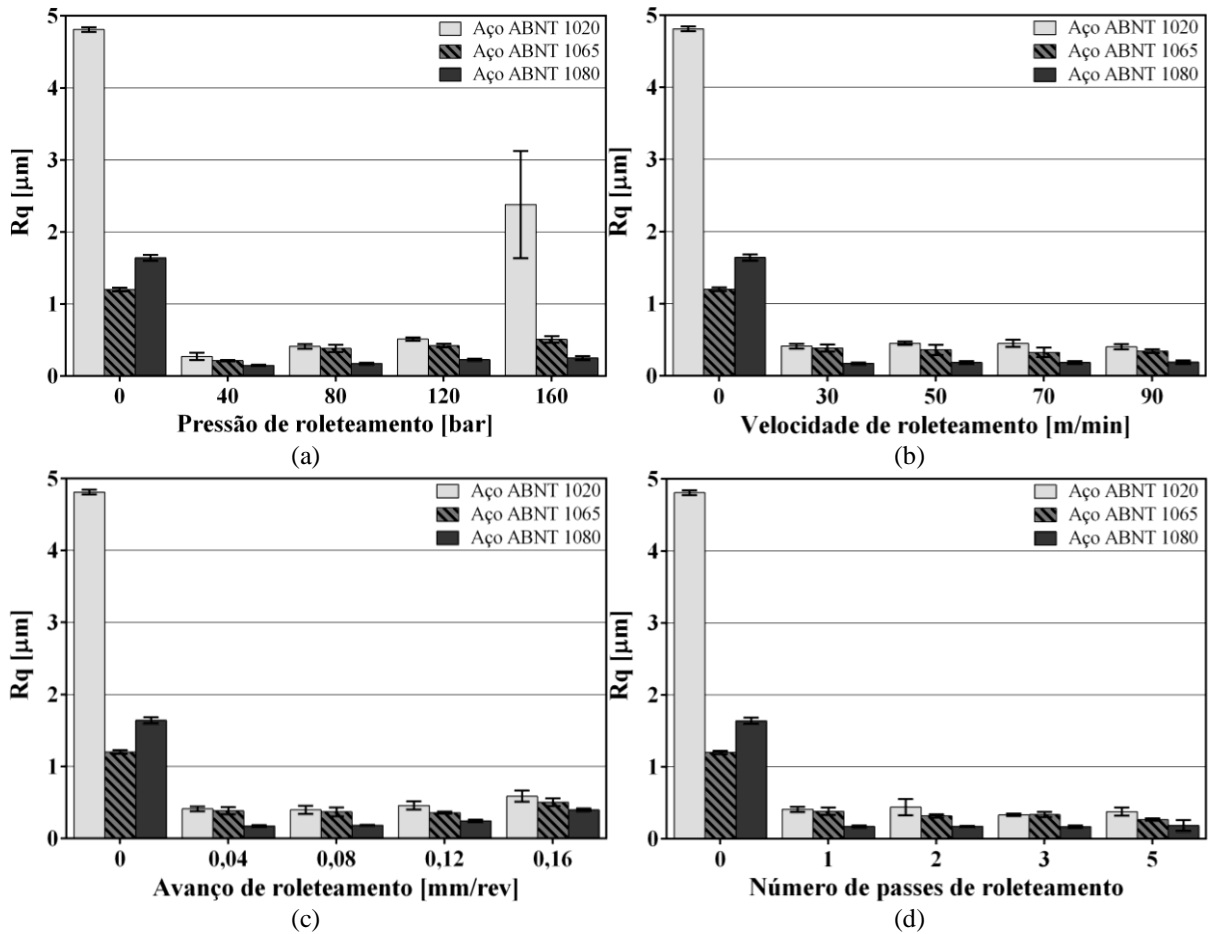


FIGURA 4.2 - Influência da pressão (a), velocidade (b), avanço (c) e número de passes (d) de roleteamento sobre o desvio médio quadrático (R_q) dos corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.

FONTE - Autor.

A FIGURA 4.2 mostra que o roleteamento provocou uma melhora significativa da qualidade superficial dos corpos de prova de aço ABNT 1020, 1065 e 1080 em relação ao que é obtido do torneamento ($P = 0$ bar, $V = 0$ m/min, $f = 0$ mm/rev e $n = 0$), independentemente da condição de roleteamento utilizada. Os menores valores médios de R_q obtidos no roleteamento dos corpos de prova de aço ABNT 1020, 1065 e 1080 foram 0,271, 0,214 e 0,147 μm , respectivamente, correspondendo a uma redução de 94,37%, 82,17% e 91,03%, respectivamente, em relação aos obtidos do torneamento (4,81, 1,20 e 1,64 μm , respectivamente). Esses valores mínimos ocorreram na condição de 40 bar, 30 m/min, 0,04 mm/rev e um passe. Esta melhoria é explicada pela deformação plástica da superfície causada pelas esferas de roleteamento, que deslocam material dos picos em direção aos vales de rugosidade. Dessa forma, a altura dos picos é reduzida em função do seu achatamento e a profundidade dos vales também é reduzida como resultado do seu preenchimento com material deslocado dos picos.

Em relação ao comportamento de R_q nas diferentes condições de roleteamento, uma melhor avaliação pode ser realizada considerando-se também a FIGURA 4.3, na qual a escala do eixo das ordenadas dos gráficos da FIGURA 4.2 foi alterada de forma a ampliar visualmente as variações de R_q nas superfícies roleteadas.

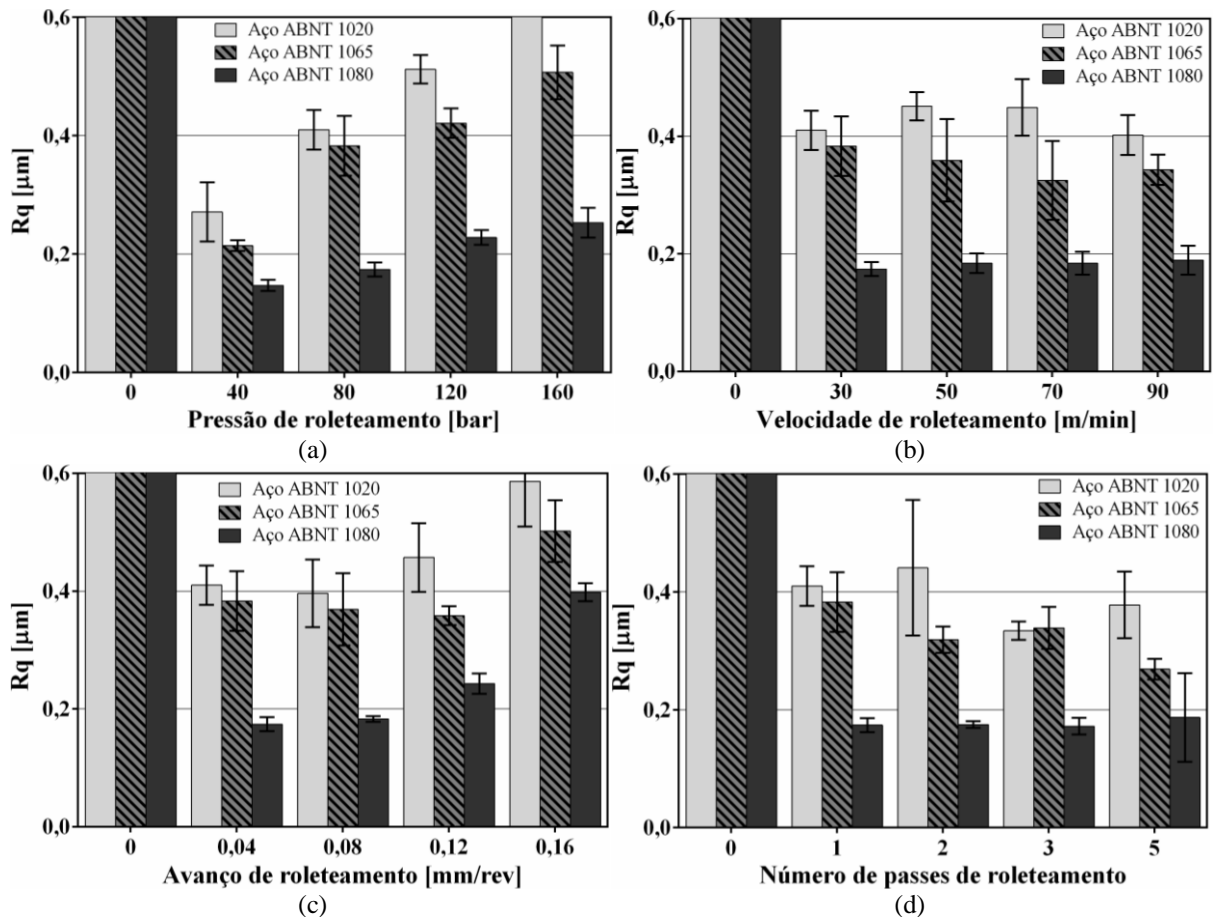


FIGURA 4.3 - Influência da pressão (a), velocidade (b), avanço (c) e número de passes (d) de roleteamento sobre o desvio médio quadrático (R_q) dos corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.

FONTE - Autor.

Os dados apresentados na FIGURA 4.2 e na FIGURA 4.3 deixam claro que, para uma mesma condição de roleteamento, os corpos de prova de aço ABNT 1080 apresentam melhor qualidade superficial que os de aço ABNT 1065 e estes exibem melhor qualidade superficial que os corpos de prova de aço ABNT 1020. Isto indica que, quanto maior a quantidade de carbono presente no aço, melhor a qualidade superficial resultante do roleteamento, o que pode ser explicado pela maior resistência à deformação plástica como resultado do aumento da quantidade de carbono no aço, que, por sua vez, pode fazer com que

a deformação da superfície ocorra de maneira mais homogênea, levando a um melhor acabamento superficial.

Como verificado na FIGURA 4.2(a) e na FIGURA 4.3(a), há uma tendência de aumento de Rq com a elevação da pressão de roleteamento; as variações significativas observadas são apresentadas na TABELA 4.2 em termos percentuais. Observa-se que essa tendência se mostra mais forte para o aço ABNT 1020, especialmente quando se eleva a pressão para 160 bar. No caso do aço ABNT 1065, a tendência de aumento de Rq com a pressão é mais leve: o aumento de 40 para 80 bar causa uma elevação significativa de Rq, porém o aumento para 120 bar não provoca mudança significativa do Rq obtido com 80 bar, apenas com 160 bar Rq volta a se elevar significativamente. O valor de Rq dos corpos de prova de aço ABNT 1080, por sua vez, mostra uma variação ainda menor com a pressão: o aumento de 40 para 80 e 120 bar faz com que Rq aumente de forma significativa, porém menor que nos outros materiais, e a utilização de 160 bar não causa alteração significativa do Rq obtido com 120 bar.

TABELA 4.2

Variação dos valores médios de Rq com o aumento da pressão de roleteamento.

Pressão [bar]	Rq médio		
	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
40	Valor base	Valor base	Valor base
80	↑51%	↑79%	↑18%
120	↑89%	↑97%	↑55%
160	↑778%	↑137%	↑72%

FONTE - Autor.

Esses resultados indicam que, a partir de 80 bar, a pressão passou a formar vales mais profundos que os gerados na superfície submetida à pressão mais baixa (40 bar) e o resultante aumento no volume de material deslocado passou a preencher os vales para além da linha média, formando picos de maior altura que a observada na superfície roleteada com 40 bar. Além disso, a descamação da camada subsuperficial também pode justificar o aumento de Rq com o aumento da pressão, El-Axir (2000) observou a deterioração do acabamento superficial pela medição de Ra na superfície de amostras do aço de baixo carbono Steel-37 roleteadas com forças acima de 250 N e isto, segundo ele, provavelmente ocorreu devido a falhas por cisalhamento da camada subsuperficial que levaram à sua descamação. Esta mesma observação foi feita por Gharbi *et al.* (2011) na superfície de amostras de aço AISI 1010 em

que se observou uma elevação de Ra com o aumento da força entre 200 e 600 N. Segundo Kuznetsov *et al.* (2015), forças altas demais induzem instabilidade de cisalhamento na camada subsuperficial que resulta em danos e irregularidades superficiais. Os resultados indicam que a deformação excessiva ou a descamação da camada subsuperficial, porém, se mostrou menos pronunciada à medida que se aumentou a quantidade de carbono presente nos aços-carbono, ocorrendo uma redução da sensibilidade de Rq à variação da pressão. Isto pode ser explicado pelo aumento da resistência à deformação plástica de aços com o aumento da sua concentração de carbono: quanto maior a resistência ao escoamento da superfície, maior será a pressão necessária para causar uma mesma quantidade de deformação e prejuízo à superfície. Assim como no estudo de Sartkulvanich (2007), em que a pressão teve o efeito mais importante sobre Ra, analisando-se todos os resultados apresentados na FIGURA 4.2 e na FIGURA 4.3 constata-se que a pressão teve o efeito mais dominante sobre Rq.

Analisando-se a FIGURA 4.3(b), verifica-se que a velocidade de roleteamento não apresentou uma influência significativa sobre Rq independentemente do material ensaiado. No caso dos aços ABNT 1020 e 1065, verifica-se uma maior variação de Rq, porém, devido à dispersão dos dados, ela não é significativa. Esta situação é similar à encontrada no estudo de Luca *et al.* (2005), no qual se verificou que a velocidade e todas as suas interações tiveram influência desprezível sobre o Ra das superfícies roleteadas, considerando um nível de significância de 95%.

No caso da FIGURA 4.2(c) e da FIGURA 4.3(c), nas quais se pode avaliar o comportamento de Rq com o avanço de roleteamento, verifica-se que há nos três materiais uma tendência de aumento de Rq com o aumento do avanço, especialmente com a utilização do avanço de 0,16 mm/rev. Isto é confirmado observando-se as variações significativas de Rq apresentadas na TABELA 4.3. Nos corpos de prova de aço ABNT 1020 verifica-se uma tendência de aumento de Rq com a elevação do avanço que se torna significativa com 0,16 mm/rev. Em relação aos corpos de prova de aço ABNT 1065, o aumento de Rq é também significativo somente com o avanço de 0,16 mm/rev. A superfície do aço ABNT 1080, por sua vez, apresenta uma elevação significativa de Rq a partir do avanço de 0,12 mm/rev.

TABELA 4.3

Variação dos valores médios de Rq com o aumento do avanço de roleteamento.

Avanço [mm/rev]	Rq médio		
	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
0,04	Valor base	Valor base	Valor base
0,08	-	-	-
0,12	-	-	↑40%
0,16	↑43%	↑31%	↑129%

FONTE - Autor.

Esses resultados configuram que ao se utilizar um avanço mais baixo, as esferas têm mais chances de deformar uma mesma região do corpo de prova, já que passarão sobre esta mais vezes em cada passe da ferramenta e, conseqüentemente, o processo poderá fornecer uma melhor qualidade superficial; quanto maior o avanço, menor é a sobreposição entre as marcas de roleteamento sucessivas. Observações similares foram feitas no estudo de El-Axir (2000), no qual, em geral, entre 0,06 e 0,34 mm/rev, avanços mais baixos reduziram o Ra da superfície de amostras do aço de baixo carbono Steel-37 (220 HV), pois, segundo ele, assim, a deformação é maior e o escoamento de metal é mais regular, e também no estudo de Gharbi *et al.* (2011) em que, com a força de 400 N e velocidades entre 20 e 70 m/min, o valor de Ra das superfícies de aço AISI 1010 também aumentou com a elevação do avanço entre 0,1 e 0,42 mm/rev. Além disso, sabe-se de Sartkulvanich (2007) e Klocke e Liermann (1998) que o emprego do roleteamento para a melhora do acabamento de uma superfície torneada deve ser feito com a utilização de um avanço de roleteamento menor que o avanço de corte utilizado no torneamento prévio, pois, caso contrário, as esferas se deslocarão paralelamente às marcas de avanço já existentes sem achatarem os picos de rugosidade. Como visto, o avanço de 0,16 mm/rev produziu um Rq mais alto em todos os materiais avaliados. Este avanço é maior que o utilizado no torneamento prévio dos corpos de prova (0,15 mm/rev). A influência do avanço sobre Rq, apesar de ser observada em todos os materiais estudados, se mostra mais significativa para o aço ABNT 1080. Isto indica que com o aumento da quantidade de carbono no aço aumenta-se a sensibilidade de Rq à variação do avanço. A maior resistência à deformação plástica oferecida pela maior concentração de carbono faz com que a sobreposição entre as marcas sucessivas das esferas de roleteamento seja mais crítica para o achatamento do perfil de rugosidade, ou seja, a superfície de maior resistência precisa de uma maior quantidade de deformação em cada região para que ocorra o achatamento do perfil.

Ao se analisar a influência do número de passes de roleteamento sobre Rq (FIGURA 4.2d, FIGURA 4.3d e TABELA 4.4), verifica-se que o Rq dos corpos de prova de aço ABNT 1020 apresentou uma queda significativa com o aumento de um para três passes, porém, com cinco passes, Rq tendeu a retornar ao patamar anterior, obtido com um ou dois passes. No caso dos corpos de prova de aço ABNT 1065, há uma tendência de redução de Rq com o aumento do número de passes, porém essa redução é apenas significativa com cinco passes. O valor de Rq dos corpos de prova de aço ABNT 1080, por outro lado, não apresentou nenhuma variação significativa com o aumento de um até cinco passes.

TABELA 4.4

Variação dos valores médios de Rq com o aumento do número de passes de roleteamento.

Número de passes	Rq médio		
	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
1	Valor base	Valor base	Valor base
2	-	-	-
3	↓18%	-	-
5	-	↓30%	-

FONTE - Autor.

Uma melhora do acabamento com o aumento do número de passes também foi encontrada tanto no estudo de El-Axir (2000) com o aço de baixo carbono Steel-37 quanto no de Morimoto (1988) com o aço de baixo carbono JIS-S38C recozido, onde se observou que o aumento do número de passes, no primeiro até quatro passes e no último até três passes, provocou uma redução do Ra das superfícies roleteadas. Tais observações podem ser justificadas pelo aumento do número de vezes que as esferas passam sobre uma mesma região, o que faz com que elas possam achatar mais os picos e preencher mais os vales da rugosidade superficial, melhorando assim, o acabamento. Contudo, uma piora do acabamento, como a observada neste trabalho com a aplicação de cinco passes de roleteamento na superfície do aço ABNT 1020 em relação ao que se observa com três passes, também foi verificada por El-Axir (2000) com a aplicação de cinco passes na superfície do aço de baixo carbono Steel-37, o que, segundo ele, está relacionada à descamação da camada subsuperficial provocada pelo seu endurecimento excessivo. A deformação plástica repetida da camada subsuperficial a partir de certo ponto, portanto, pode levar ao excesso de deformação ou à descamação do material e ao prejuízo da rugosidade superficial. O comportamento observado dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080 com a elevação do número de passes pode indicar que o

aumento da quantidade de carbono causa uma redução da sensibilidade de R_q a esse parâmetro. Isto pode ser explicado pelo aumento da resistência à deformação plástica dos aços com a elevação da sua concentração de carbono, dificultando assim, a deformação dos picos de rugosidade mesmo com as esferas passando sobre eles repetidas vezes.

4.2.1.2 Picos e vales

Conforme a norma NBR ISO 4287:2002 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002), os parâmetros de amplitude altura máxima do pico (R_p) e profundidade máxima do vale (R_v) do perfil de rugosidade se complementam para formar a altura máxima do perfil (R_z). A FIGURA 4.4 apresenta o comportamento dos parâmetros R_p , R_v e, conseqüentemente, R_z nas superfícies dos corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080, como resultado de diferentes condições de pressão, velocidade, avanço e número de passes de roleteamento. A influência desses parâmetros de roleteamento pode ser avaliada mais detalhadamente analisando-se também a FIGURA 4.5, na qual são apresentados os gráficos da FIGURA 4.4 com o eixo das ordenadas em uma escala ampliada que facilita a visualização de algumas informações.

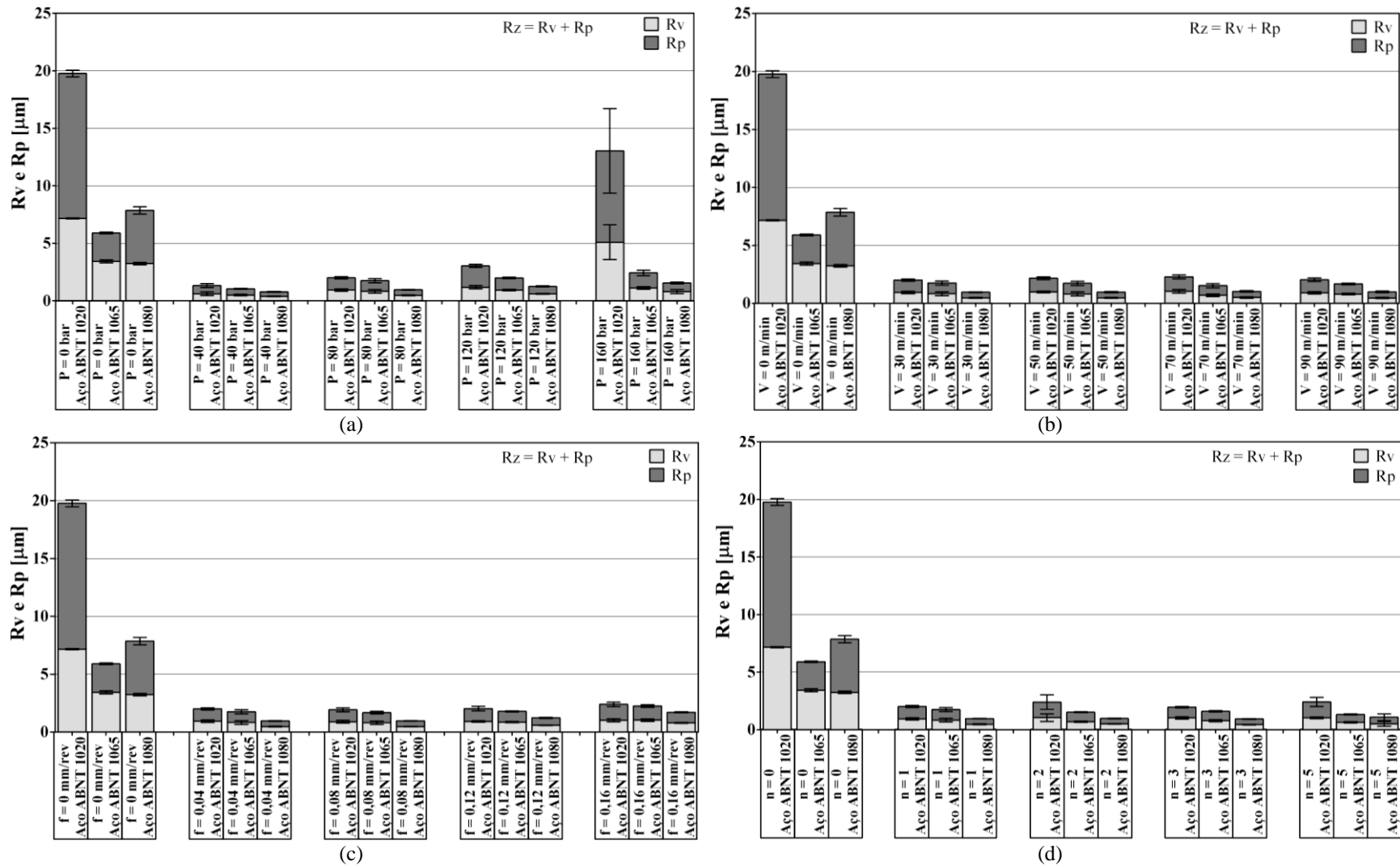


FIGURA 4.4 - Influência da pressão (a), velocidade (b), avanço (c) e número de passes (d) de roleteamento sobre a altura máxima do pico do perfil (Rp) e a profundidade máxima do vale do perfil (Rv) dos corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.

FONTES - Autor.

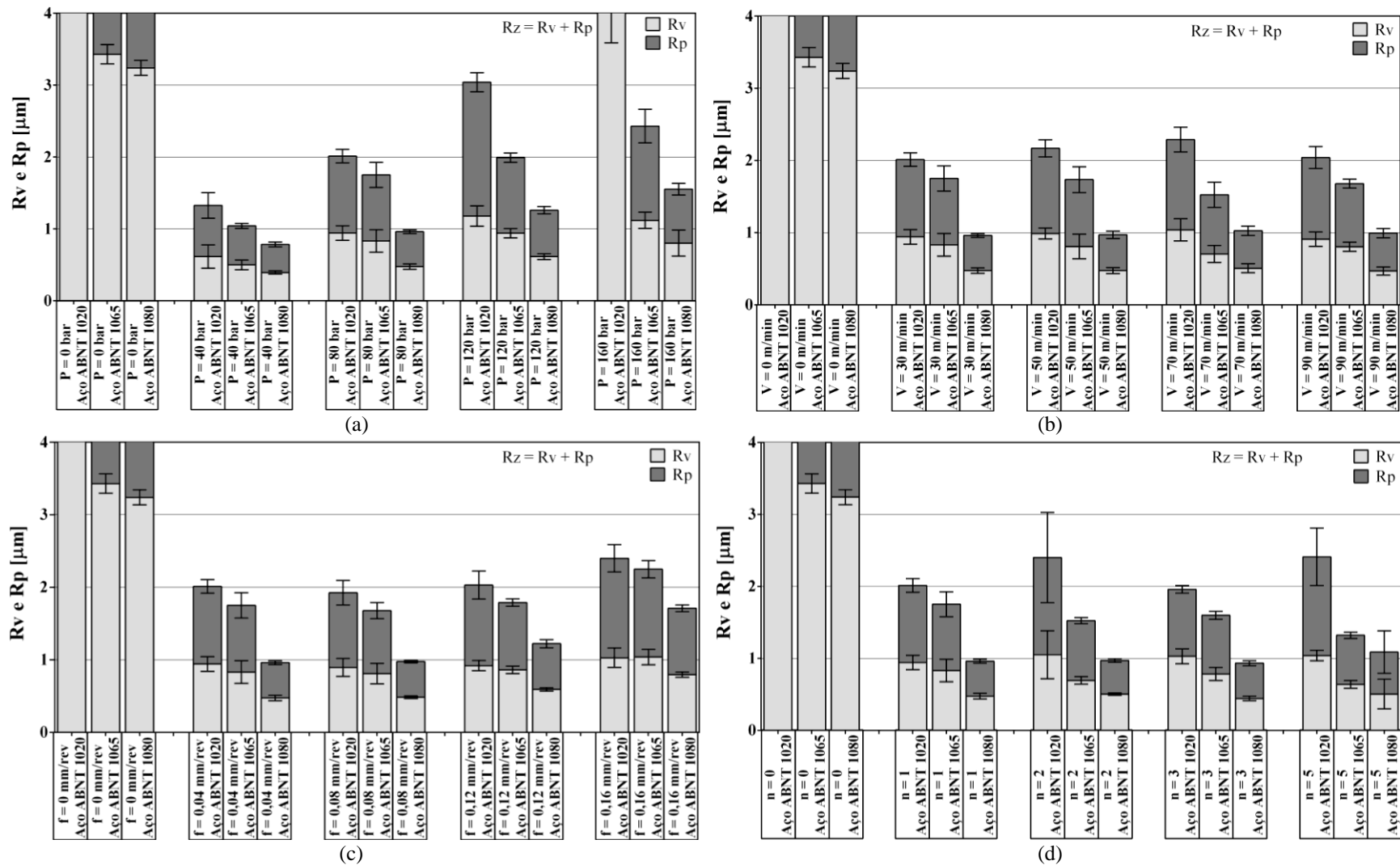


FIGURA 4.5 - Influência da pressão (a), velocidade (b), avanço (c) e número de passes (d) de roleteamento sobre a altura máxima do pico do perfil (Rp) e a profundidade máxima do vale do perfil (Rv) dos corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.

FONTE - Autor.

A FIGURA 4.4 e a FIGURA 4.5 deixam claro que o roleteamento promove uma grande redução de R_p e R_v e que os seus menores valores, assim como no caso de R_q , ocorrem quando os corpos de prova são roleteados com 40 bar (a menor pressão utilizada), 30 m/min, 0,04 mm/rev e um passe. Neste caso, os valores médios de R_p nas superfícies de aço ABNT 1020, 1065 e 1080 são reduzidos de 12,6, 2,47 e 4,62 μm , respectivamente, para 0,712, 0,542 e 0,391 μm , correspondendo a uma redução de 94,35%, 78,06% e 91,54%, respectivamente. Em relação à R_v , verificou-se que os valores médios nas superfícies de aço ABNT 1020, 1065 e 1080 são reduzidos em 91,42%, 85,39% e 87,84%, ou seja, de 7,17, 3,43 e 3,24 μm para 0,615, 0,501 e 0,394 μm , respectivamente. Além disso, é bastante evidente que, independentemente da condição de roleteamento, o aço ABNT 1080 apresenta os menores valores de R_p e R_v seguido pelo aço ABNT 1065 e por último fica o aço ABNT 1020. Como resultado, pode-se dizer que o aumento na concentração de carbono também causa uma redução significativa de R_p e R_v , o que pode também estar relacionado a uma maior homogeneidade da deformação plástica durante o processo nos aços com maior resistência mecânica.

A FIGURA 4.4(a), a FIGURA 4.5(a) e a TABELA 4.5 mostram que o aumento da pressão de roleteamento causou um aumento de R_p e R_v nas superfícies dos três materiais. Mais especificamente, em relação às superfícies de aço ABNT 1020, o aumento da pressão de 40 para 80, 120 e 160 bar causou um aumento significativo de R_p e R_v . Essa piora do acabamento superficial foi menor nas superfícies de aço ABNT 1065: o aumento de 40 para 80 bar promoveu um aumento significativo de R_p , porém os aumentos posteriores da pressão não causaram uma elevação significativa adicional de R_p e o aumento significativo de R_v ocorreu quando a pressão foi aumentada de 40 para 80 e 160 bar, não havendo alteração significativa de 80 para 120 bar. Com relação aos corpos de prova de aço ABNT 1080, verifica-se que o aumento da pressão de 120 para 160 bar não causa uma alteração significativa de R_p ou R_v ; ambos são aumentados significativamente, porém, quando a pressão é elevada de 40 para 80 e 120 bar.

TABELA 4.5

Variação dos valores médios de Rp e Rv com o aumento da pressão de roleteamento.

Pressão [bar]	Rp médio		
	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
40	Valor base	Valor base	Valor base
80	↑50%	↑70%	↑24%
120	↑161%	↑94%	↑65%
160	↑1014%	↑142%	↑92%
Pressão [bar]	Rv médio		
	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
40	Valor base	Valor base	Valor base
80	↑53%	↑66%	↑21%
120	↑92%	↑88%	↑56%
160	↑729%	↑124%	↑104%

FONTE - Autor.

O aumento de Rp e Rv com o aumento da pressão pode ser explicado pelo aumento da altura dos picos e também da profundidade dos vales de rugosidade quando se aplica mais carga sobre a superfície; não se observou nenhuma tendência de aumento maior dos vales ou dos picos (a variação pareceu similar em ambos os casos), indicando que não há um fenômeno preferencial. O aumento observado nos valores de Rp e Rv com a elevação da pressão nos três materiais utilizados é similar ao observado por Abrão *et al.* (2014b) no roleteamento de corpos de prova de aço AISI 1060 plenamente recozido (290 HV) com o aumento da pressão para além de 50 bar, devido, segundo eles, à crescente deformação plástica e ao lascamento da superfície desse material. A descamação da camada subsuperficial com o aumento da pressão pode, dessa forma, também justificar a elevação observada de Rp e Rv. Além disso, da mesma forma que com Rq, o aumento da quantidade de carbono torna Rp e Rv menos sensíveis à pressão em razão da elevação do seu limite de escoamento.

Considerando a variação da velocidade de roleteamento, conforme verificado na FIGURA 4.5(b), não se observou nenhuma alteração significativa de Rp ou Rv nos três materiais.

Quando se avaliou a influência do avanço de roleteamento na FIGURA 4.4(c), na FIGURA 4.5(c) e na TABELA 4.6, foi constatado nos corpos de prova de aço ABNT 1020 que ocorreu variação significativa apenas em Rp, onde se observou uma elevação com o aumento do avanço de 0,04 para 0,16 mm/rev. Em relação aos corpos de prova de aço ABNT 1065, os valores de Rp e Rv não foram alterados significativamente com o avanço. Por outro

lado, quando o avanço foi elevado de 0,04 para 0,12 e 0,16 mm/rev, tanto Rp quanto Rv apresentaram um aumento significativo nas superfícies de aço ABNT 1080.

TABELA 4.6

Variação dos valores médios de Rp e Rv com o aumento do avanço de roleteamento.

Avanço [mm/rev]	Rp médio		
	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
0,04	Valor base	Valor base	Valor base
0,08	-	-	-
0,12	-	-	↑30%
0,16	↑28%	-	↑88%
Avanço [mm/rev]	Rv médio		
	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
0,04	Valor base	Valor base	Valor base
0,08	-	-	-
0,12	-	-	↑25%
0,16	-	-	↑67%

FONTE - Autor.

Esses resultados indicam que a variação do avanço tende a alterar mais a deformação dos picos do que a dos vales de rugosidade e que o aumento do teor de carbono, em razão do aumento da deformação necessária para o achatamento do perfil, promove também um aumento considerável da influência do avanço sobre Rp e Rv, com este passando a alterar significativamente a deformação dos vales. Além disso, os resultados encontrados mostram novamente que o aumento do avanço de roleteamento causa um prejuízo do acabamento das superfícies, o que também pode ser explicado pela redução da sobreposição entre as marcas sucessivas das esferas.

Com relação à influência do número de passes de roleteamento apresentada na FIGURA 4.4(d), na FIGURA 4.5(d) e na TABELA 4.7, tanto Rp quanto Rv não apresentaram alteração significativa no aço ABNT 1020. No caso dos corpos de prova de aço ABNT 1065, apenas quando cinco passes foram aplicados o valor de Rp sofreu redução significativa; o aumento de um para dois ou três passes não causou variação significativa de Rp e nenhuma variação significativa de Rv foi observada. Os dados relativos às superfícies de aço ABNT 1080 também não mostraram nenhuma alteração significativa de Rp ou Rv com o número de passes.

TABELA 4.7

Variação dos valores médios de Rp e Rv com o aumento do número de passes de roleteamento.

Número de passes	Rp médio		
	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
1	Valor base	Valor base	Valor base
2	-	-	-
3	-	-	-
5	-	↓26%	-
Número de passes	Rv médio		
	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
1	Valor base	Valor base	Valor base
2	-	-	-
3	-	-	-
5	-	-	-

FONTE - Autor.

A redução dos parâmetros Rp e Rv com a elevação do número de passes é esperada, pois ela causa um aumento do número de vezes que as esferas passam sobre cada região dos corpos de prova, aumentando a quantidade de deformação plástica dos picos e o preenchimento dos vales de rugosidade. Neste caso, porém, o número de passes não apresentou influência considerável sobre Rp ou Rv. Uma pequena influência do número de passes sobre Rp e Rv também foi observada por Abrão *et al.* (2014b) com a aplicação de até três passes de roleteamento na superfície de corpos de prova de aço AISI 1060 plenamente recozido (290 HV).

4.2.2 Parâmetros da curva da razão portante do perfil

A curva da razão portante do perfil (curva de Abbott-Firestone) é uma medida da razão entre material e ambiente e expressa uma porcentagem em cada nível acima e abaixo da linha média do perfil de rugosidade (WHITEHOUSE, 2002). Dentre os parâmetros desta curva, foram escolhidos para a avaliação das superfícies a profundidade do núcleo do perfil (Rk), a altura de pico reduzida (Rpk) e a profundidade de vale reduzida (Rvk), que estão ilustrados na FIGURA 4.6. A curva da razão portante do perfil e os seus parâmetros são funcionalmente importantes, por exemplo, na fabricação de camisas de cilindros de motores automotivos, Rpk representa a quantidade de material desgastado rapidamente quando o motor entra em funcionamento, Rk determina a vida útil do cilindro e Rvk indica a retenção de óleo da superfície (WHITEHOUSE, 2002). A FIGURA 4.7 apresenta o comportamento

desses parâmetros sob diferentes condições de pressão, velocidade, avanço e número de passes. A FIGURA 4.8, logo em seguida, mostra os mesmos gráficos da FIGURA 4.7, porém com o eixo das ordenadas em uma escala que melhora a visualização dos dados das superfícies roleteadas.

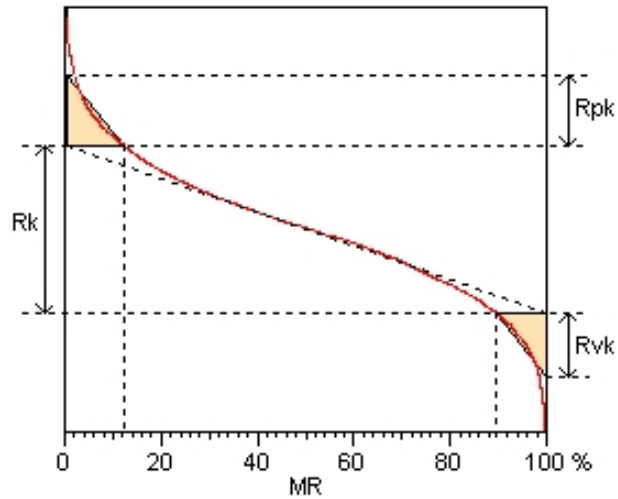


FIGURA 4.6 - Ilustração dos parâmetros profundidade do núcleo do perfil (R_k), altura de pico reduzida (R_{pk}) e profundidade de vale reduzida (R_{vk}) em uma curva de razão portante (MR) do perfil (curva de Abbott-Firestone).

FONTE - Autor.

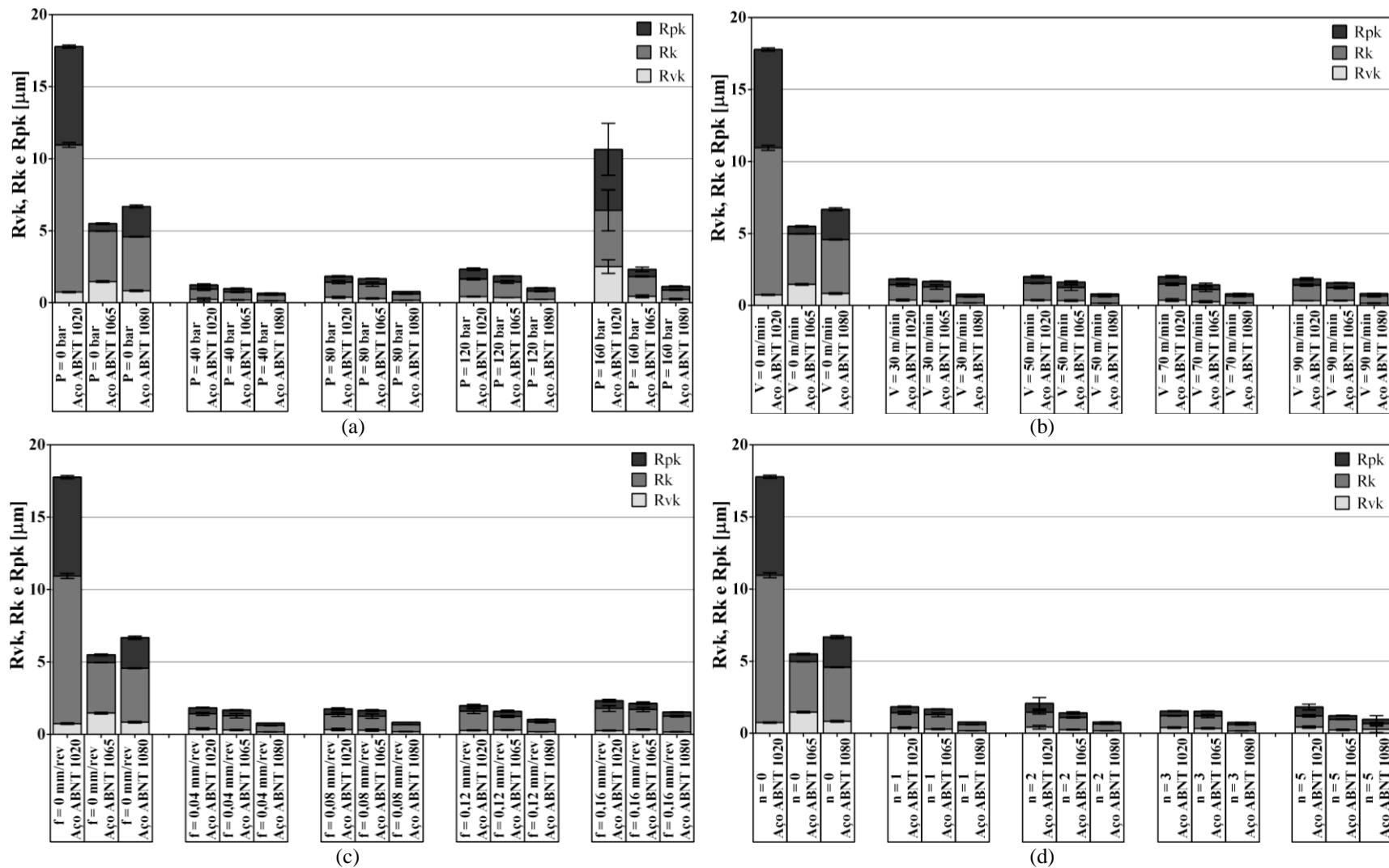


FIGURA 4.7 - Influência da pressão (a), velocidade (b), avanço (c) e número de passes (d) de roleteamento sobre a profundidade do núcleo do perfil (Rk), a altura de pico reduzida (Rpk) e a profundidade de vale reduzida (Rvk) dos corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.

FONTES - Autor.

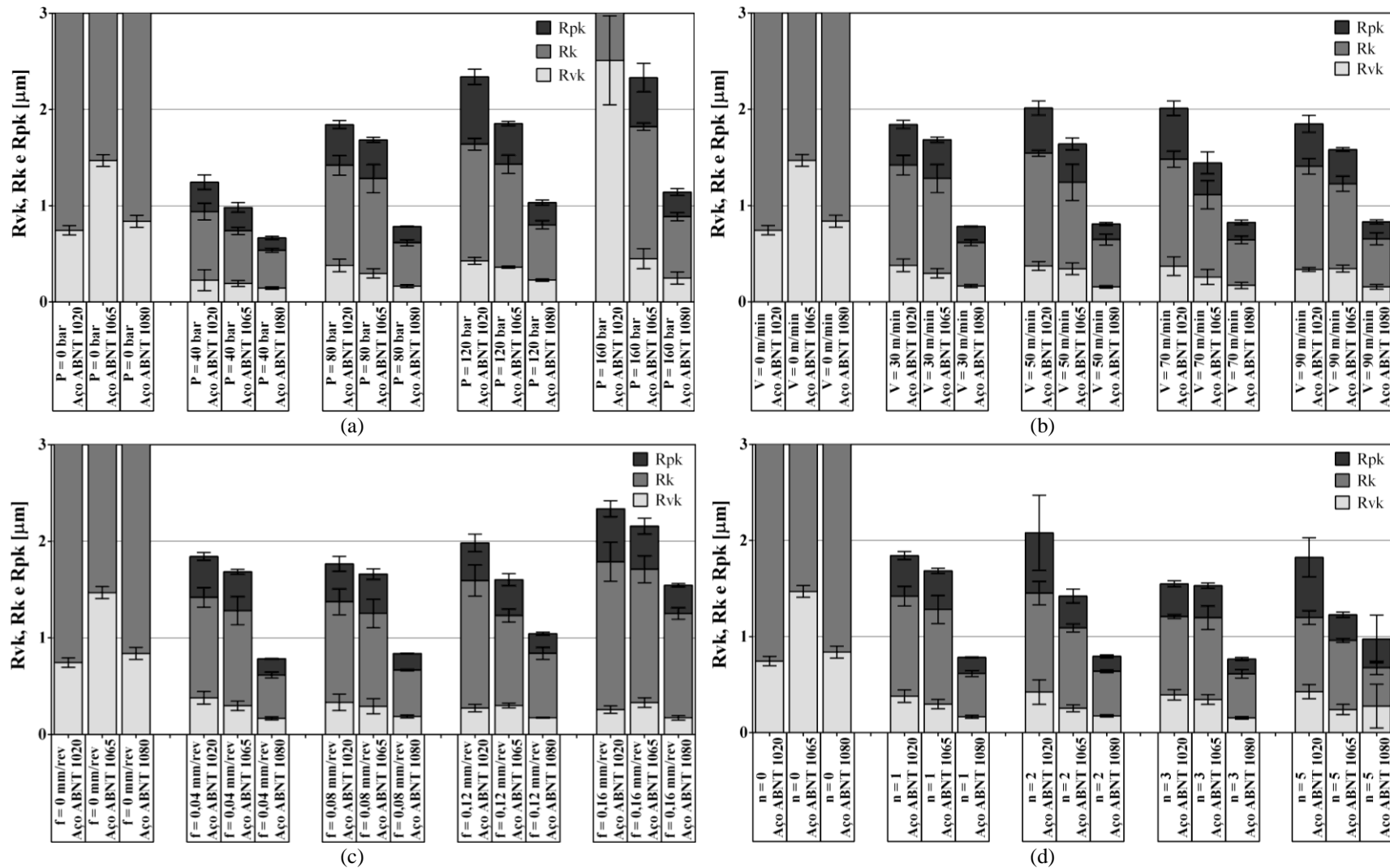


FIGURA 4.8 - Influência da pressão (a), velocidade (b), avanço (c) e número de passes (d) de roleteamento sobre a profundidade do núcleo do perfil (Rk), a altura de pico reduzida (Rpk) e a profundidade de vale reduzida (Rvk) das superfícies dos corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.

FONTE - Autor.

Conforme mostrado na FIGURA 4.7 e na FIGURA 4.8, o roleteamento promoveu uma redução significativa de R_k , R_{vk} e R_{pk} nas superfícies dos três materiais em todas as condições, com a exceção de duas. A condição que resultou na maior redução desses parâmetros de rugosidade também foi a que utilizou 40 bar, 30 m/min, 0,04 mm/rev e um passe. Nesta condição, para os corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080, R_{vk} foi reduzido em 69,53%, 86,87% e 82,72%, respectivamente, R_k foi reduzido em 93,02%, 84,36% e 89,52%, respectivamente, e R_{pk} foi reduzido em 95,51%, 55,23% e 93,82%, respectivamente, em relação aos dados coletados nos corpos de prova apenas torneados ($P = 0$ bar, $V = 0$ m/min, $f = 0$ mm/rev e $n = 0$). A aplicação de 160 bar, por sua vez, causou uma elevação de R_{vk} em 236,91% em relação ao da superfície do aço ABNT 1020 apenas torneada e não alterou o R_{pk} medido nos corpos de prova de aço ABNT 1065 antes e após o roleteamento. Esses resultados mostram que o roleteamento geralmente causa o achatamento do perfil de rugosidade, mas, em algumas condições, é possível causar o prejuízo da superfície caso a deformação imposta seja excessiva ou ocorra descamação da camada subsuperficial. Além disso, foi constatado que, em geral, quando uma mesma condição é utilizada, os corpos de prova de aço ABNT 1080 apresentaram os menores R_{vk} , R_k e R_{pk} , seguido pelos de aço ABNT 1065 e, por último, os de aço ABNT 1020, o que indica, também neste caso, que o aumento do teor de carbono e da resistência à deformação plástica permite a obtenção de uma superfície de melhor qualidade com o roleteamento.

Ao se analisar o comportamento dos parâmetros R_{vk} , R_k e R_{pk} com o aumento da pressão de roleteamento apresentado na FIGURA 4.7(a), na FIGURA 4.8(a) e na TABELA 4.8, verifica-se uma tendência de elevação em todos os materiais. No caso do aço ABNT 1020, esta tendência se mostra mais acentuada, um aumento significativo de R_{vk} e R_{pk} ocorre quando a pressão é elevada de 40 para 120 e 160 bar. O valor de R_k , por sua vez, apresenta um acréscimo significativo já a partir da pressão de 80 bar, porém em menor extensão. Quando se considera o aço ABNT 1065, se verifica que R_{vk} sofre um aumento significativo com a pressão sendo elevada de 40 para 80 e 120 bar; com 160 bar, R_{vk} é mantido no valor encontrado para 120 bar. Também se observa que o aumento inicial da pressão até 80 bar causa um crescimento significativo de R_k e R_{pk} , porém, enquanto R_{pk} mantém seu valor adquirido com 80 bar mesmo com os aumentos adicionais de pressão, R_k apresenta um novo aumento significativo para 160 bar. Os resultados do aço ABNT 1080 mostram que o valor de R_{vk} aumenta significativamente apenas quando se eleva a pressão para 120 bar; a partir desse ponto não há mais variação significativa. Os valores de R_k e R_{pk} ,

por outro lado, apresentam aumentos a partir de 80 bar, mas mantêm o valor adquirido com 120 bar mesmo com 160 bar.

TABELA 4.8

Variação dos valores médios de Rvk, Rk e Rpk com o aumento da pressão de roleteamento.

Pressão [bar]	Rvk médio		
	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
40	Valor base	Valor base	Valor base
80	-	↑54%	-
120	↑89%	↑88%	↑58%
160	↑1006%	↑134%	↑72%
Pressão [bar]	Rk médio		
	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
40	Valor base	Valor base	Valor base
80	↑46%	↑80%	↑15%
120	↑70%	↑96%	↑47%
160	↑448%	↑151%	↑63%
Pressão [bar]	Rpk médio		
	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
40	Valor base	Valor base	Valor base
80	-	↑65%	↑30%
120	↑22%	↑73%	↑77%
160	↑1281%	↑109%	↑102%

FONTE - Autor.

Esses resultados indicam claramente que o aumento da pressão além de 40 bar torna as superfícies cada vez mais acidentadas, o que significa que as cargas produzidas por pressões além de 40 bar são excessivas para os três materiais estudados, aumentando a profundidade dos vales e a altura dos picos ao invés de causar seu maior achatamento. Situação similar foi observada por Abrão *et al.* (2014b) em superfícies de aço AISI 1060 plenamente recozido, os valores desses parâmetros funcionais diminuíram significativamente após o roleteamento com 50 bar e aumentaram acentuadamente com a subsequente elevação da pressão.

Em relação à velocidade de roleteamento, pode-se observar na FIGURA 4.8(b) que sua variação também não apresentou influência significativa sobre Rvk, Rk e Rpk.

O avanço de roleteamento, conforme mostrado na FIGURA 4.7(c), na FIGURA 4.8(c) e na TABELA 4.9, apresentou uma influência significativa sobre Rvk, Rk e Rpk. Em relação às superfícies de aço ABNT 1020, observou-se uma tendência de redução de Rvk, que

se mostrou significativa para 0,12 mm/rev, mas de 0,12 para 0,16 mm/rev ele se mostrou estável. Os valores de Rk e Rpk, por outro lado, apresentaram uma tendência de elevação com o aumento do avanço. No caso de Rk, este aumento foi significativo para 0,12 mm/rev e o patamar adquirido foi mantido para 0,16 mm/rev. Já o valor de Rpk apresentou um aumento significativo apenas para 0,16 mm/rev. No caso do aço ABNT 1065, apenas foi observada variação significativa de Rk, que sofreu um aumento significativo com a elevação do avanço para 0,16 mm/rev. Considerando o aço ABNT 1080, enquanto Rvk não sofreu alteração significativa com o avanço, Rk e Rpk sofreram aumento significativo com a elevação do avanço de 0,04 para 0,12 e 0,16 mm/rev.

TABELA 4.9

Variação dos valores médios de Rvk, Rk e Rpk com o aumento do avanço de roleteamento.

Avanço [mm/rev]	Rvk médio		
	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
0,04	Valor base	Valor base	Valor base
0,08	-	-	-
0,12	↓28%	-	-
0,16	↓32%	-	-
Avanço [mm/rev]	Rk médio		
	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
0,04	Valor base	Valor base	Valor base
0,08	-	-	-
0,12	↑27%	-	↑49%
0,16	↑47%	↑40%	↑141%
Avanço [mm/rev]	Rpk médio		
	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
0,04	Valor base	Valor base	Valor base
0,08	-	-	-
0,12	-	-	↑20%
0,16	↑29%	-	↑72%

FONTE - Autor.

Os resultados encontrados, portanto, indicam que Rk e Rpk tendem a aumentar com o acréscimo do avanço utilizado no roleteamento, o que é justificado pela menor sobreposição da deformação das esferas, que causa um menor achatamento do perfil. O valor de Rvk, por outro lado, não apresentou variação significativa com o avanço. Dessa forma, pode-se concluir que o avanço afeta mais a deformação dos picos e também da parte central do perfil, apresentando pouca influência sobre a deformação plástica do material nos vales.

Além disso, verificou-se que o aumento da concentração de carbono torna os parâmetros Rk e Rpk da superfície mais sensíveis ao avanço de roleteamento.

Conforme observado na FIGURA 4.7(d), na FIGURA 4.8(d) e na TABELA 4.10, o número de passes de roleteamento apresentou pouca influência sobre Rk e Rpk e nenhuma sobre Rvk. Avaliando-se especificamente o aço ABNT 1020, observa-se que, com três passes, Rk e Rpk apresentam uma sensível redução, porém, com o aumento para cinco passes, Rk se mantém no valor adquirido com três passes e Rpk apresenta um aumento que o faz retornar ao patamar encontrado com um ou dois passes. Em relação às superfícies de aço ABNT 1065, o valor de Rk apresenta uma tendência de redução com o aumento do número de passes, que se torna significativa, porém, apenas com cinco passes. Por outro lado, Rpk é reduzido significativamente já com três passes e tem uma redução adicional com cinco passes. Os valores de Rvk, Rk e Rpk, contudo, não apresentaram nenhuma alteração significativa nos corpos de prova de aço ABNT 1080 com a variação do número de passes.

TABELA 4.10

Variação dos valores médios de Rvk, Rk e Rpk com o aumento do número de passes de roleteamento.

Número de passes	Rvk médio		
	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
1	Valor base	Valor base	Valor base
2	-	-	-
3	-	-	-
5	-	-	-
Número de passes	Rk médio		
	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
1	Valor base	Valor base	Valor base
2	-	-	-
3	↓22%	-	-
5	↓26%	↓27%	-
Número de passes	Rpk médio		
	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
1	Valor base	Valor base	Valor base
2	-	-	-
3	↓19%	↓17%	-
5	-	↓33%	-

FONTE - Autor.

Esses resultados indicam que o aumento do número de passes tende a causar um maior achatamento da superfície, já que, com o aumento do número de passes, a esfera pode

causar mais deformação em cada região da superfície passando sobre ela mais vezes. Além disso, os resultados indicam que o número de passes afeta significativamente a deformação dos picos de rugosidade, não tendo a mesma influência sobre a deformação dos vales. Observa-se também que o aumento do teor de carbono promoveu a redução da influência do número de passes sobre os parâmetros R_k e R_{pk} , o que é justificado pelo aumento da resistência à deformação plástica dos aços, que dificulta a modificação da superfície pelo roleteamento.

4.3 Microdureza

Além de alterar a rugosidade superficial, o roleteamento induz deformação plástica e tensões residuais tanto na superfície quanto em camadas de material próximas a ela e, conseqüentemente, promove a alteração da microdureza superficial e subsuperficial.

4.3.1 Microdureza superficial

A FIGURA 4.9 apresenta a influência dos parâmetros de roleteamento estudados (pressão, velocidade, avanço e número de passes) sobre a microdureza da superfície dos corpos de prova de aço ABNT 1020, 1065 e 1080, apresentando-se os dados coletados nas superfícies apenas torneadas ($P = 0$ bar, $V = 0$ m/min, $f = 0$ mm/rev e $n = 0$) juntamente com os coletados nas superfícies roleteadas de acordo com a TABELA 3.5.

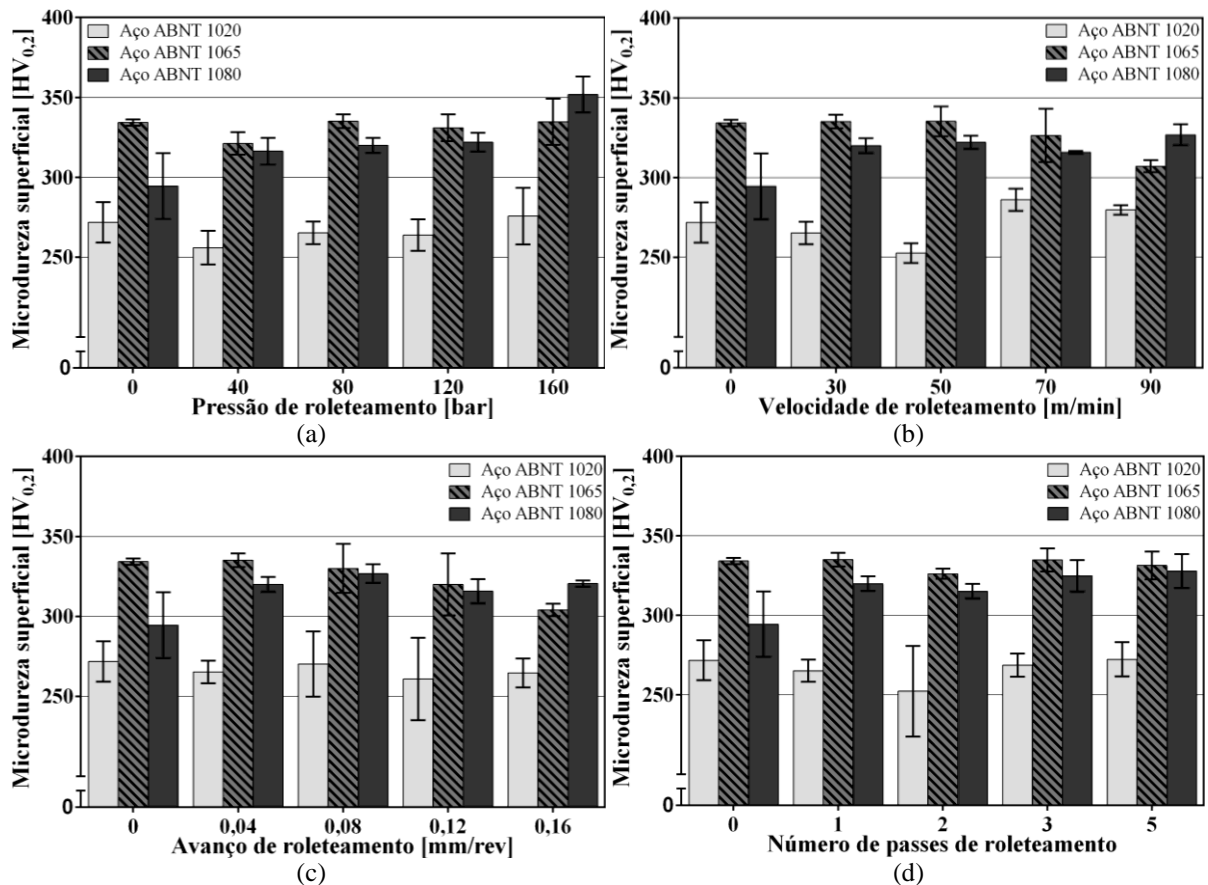


FIGURA 4.9 - Influência da pressão (a), velocidade (b), avanço (c) e número de passes (d) de roleteamento sobre a microdureza da superfície dos corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.

FONTE - Autor.

Verifica-se claramente na FIGURA 4.9 que a microdureza da superfície do aço ABNT 1020 sofreu influência apenas da velocidade de roleteamento. Conforme mostrado na FIGURA 4.9(b) e na TABELA 4.11, o aumento da velocidade até 50 m/min mostrou uma tendência de redução da microdureza superficial, mas apenas com 50 m/min a redução foi significativa. Posteriormente, porém, a microdureza superficial foi elevada de forma significativa até o patamar inicial com o aumento da velocidade para 70 m/min e mantida lá com o aumento adicional para 90 m/min.

A FIGURA 4.9 e a TABELA 4.11 mostram que a microdureza superficial dos corpos de prova de aço ABNT 1065, por sua vez, foi mais sensível aos parâmetros de roleteamento. Verificou-se que o uso da pressão mais baixa (40 bar) causou uma redução da microdureza superficial em relação à da superfície apenas torneada, porém ela retornou ao patamar inicial ao se aumentar a pressão para 80 bar e foi mantida lá com a elevação adicional para 120 e 160 bar. Observou-se também que o aumento da velocidade não provocou nenhuma alteração significativa da microdureza superficial até 90 m/min, valor que levou a

uma redução da microdureza superficial em relação à da superfície apenas torneada. De forma similar, a microdureza superficial mostrou uma tendência de redução com o aumento do avanço até 0,16 mm/rev em relação à da superfície apenas torneada. Por fim, não se constatou nenhuma variação significativa da microdureza com o número de passes, com a exceção de quando se utilizou dois passes e ocorreu uma redução leve da microdureza em relação à da superfície apenas torneada.

Conforme observado na FIGURA 4.9(a) e na TABELA 4.11, a microdureza superficial dos corpos de prova de aço ABNT 1080 mostrou uma tendência de elevação com o aumento da pressão, mostrando um aumento significativo a partir da aplicação de 80 bar, em relação à microdureza da superfície apenas torneada; entre 80 e 120 bar, porém, não ocorreu variação significativa da microdureza superficial. Além disso, constatou-se que o roleteamento com velocidades a partir de 30 m/min causou uma elevação significativa da microdureza superficial encontrada no corpo de prova apenas torneado, com a exceção de 70 m/min; o valor adquirido com 30 m/min, porém, não foi alterado significativamente com os demais acréscimos de velocidade. Situação similar foi observada com a variação do avanço: com exceção de 0,12 mm/rev, todos os avanços utilizados provocaram uma elevação significativa da microdureza superficial em relação à encontrada no corpo de prova apenas torneado. Entretanto, o valor encontrado com 0,04 mm/rev não sofreu variações significativas com os acréscimos aplicados sobre esse avanço. Em relação ao número de passes, apenas para um e cinco passes de roleteamento foi observada uma elevação da microdureza superficial, em relação ao que é encontrado na superfície apenas torneada, porém, em razão da dispersão dos resultados, não se pode afirmar que a utilização de um número de passes superior a um causou alteração significativa da microdureza superficial.

TABELA 4.11

Variação da microdureza superficial com os parâmetros de roleteamento.

Pressão [bar]	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
0 (torneada)	Valor base	Valor base	Valor base
40	-	↓4%	-
80	-	-	↑9%
120	-	-	↑9%
160	-	-	↑19%
Velocidade [m/min]	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
0 (torneada)	Valor base	Valor base	Valor base
30	-	-	↑9%
50	↓7%	-	↑9%
70	-	-	-
90	-	↓8%	↑11%
Avanço [mm/rev]	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
0 (torneada)	Valor base	Valor base	Valor base
0,04	-	-	↑9%
0,08	-	-	↑11%
0,12	-	-	-
0,16	-	↓9%	↑9%
Número de passes	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
0 (torneada)	Valor base	Valor base	Valor base
1	-	-	↑9%
2	-	↓2%	-
3	-	-	-
5	-	-	↑11%

FONTE - Autor.

O aumento da microdureza superficial que foi observado nos corpos de prova de aço ABNT 1080 em diversas condições de roleteamento pode ser explicado pela introdução de deslocamentos adicionais com a deformação plástica a frio da superfície, aumentando seu grau de encruamento. Em geral, no estudo de Abrão *et al.* (2014a) com o aço AISI 1060, também foi observado um aumento da dureza superficial com a elevação da pressão e do número de passes, porém, assim como neste trabalho, em algumas circunstâncias (100 bar e um passe e 50 bar e três passes) foi constatado um amaciamento da superfície, situação prevista por Altenberger (2005) e Schulze (2006), ou uma manutenção da microdureza superficial antes e após o roleteamento. Estas situações, segundo Abrão *et al.* (2014a), podem estar associadas a uma maior uniformização das deslocamentos induzidas previamente pelo torneamento.

4.3.2 Perfil de microdureza abaixo da superfície

Além da microdureza superficial dos corpos de prova, foi também avaliado o perfil de microdureza abaixo das superfícies dos três materiais para se conhecer o seu comportamento com a variação dos parâmetros de roleteamento, pressão, velocidade, avanço e número de passes.

Pela análise da microdureza subsuperficial, é possível, como no estudo de Seemikeri *et al.* (2008), determinar a profundidade da zona deformada plasticamente. É importante salientar que a microdureza pode ser afetada por heterogeneidades presentes na microestrutura resultantes da fabricação dos materiais utilizados, levando a pequenas variações entre os valores medidos em um mesmo corpo de prova e entre corpos de prova de um mesmo material. Dessa forma, a determinação da profundidade da camada subsuperficial afetada pelo roleteamento foi realizada neste trabalho analisando-se cuidadosamente o perfil de microdureza subsuperficial para a identificação da profundidade a partir da qual a microdureza se torna aproximadamente constante.

Os resultados da microdureza subsuperficial nos corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080 submetidos às condições da TABELA 3.6 são apresentados na FIGURA 4.10, na FIGURA 4.11 e na FIGURA 4.12, respectivamente. Os perfis referentes à condição apenas torneada ($P = 0$ bar, $V = 0$ m/min, $f = 0$ mm/rev e $n = 0$), representados por linhas pontilhadas, e à condição roleteada com $P = 80$ bar, $V = 30$ m/min, $f = 0,04$ mm/rev e $n = 1$ (linhas tracejadas) estão replicados em todos os gráficos para a análise comparativa da elevação dos parâmetros individuais.

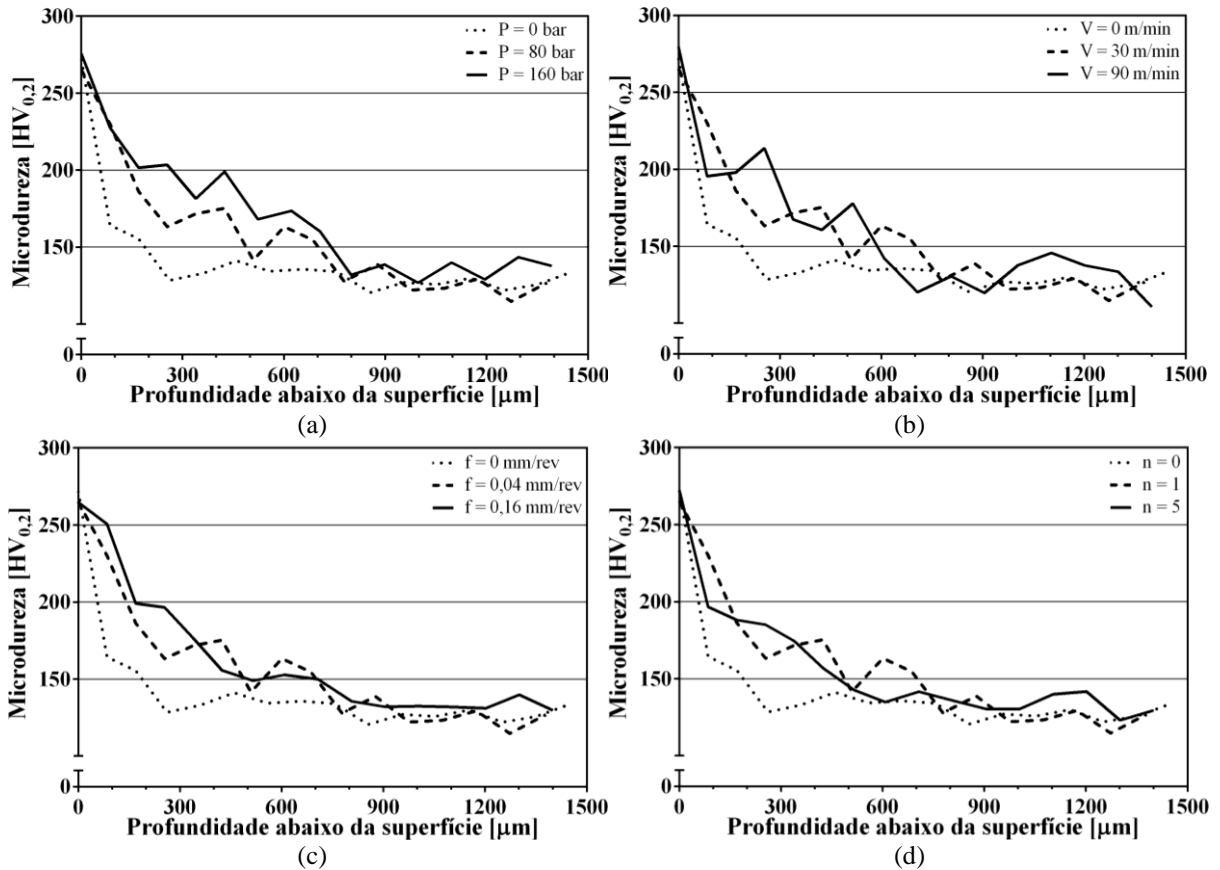


FIGURA 4.10 - Influência da pressão (a), velocidade (b), avanço (c) e número de passes (d) de roleteamento sobre o perfil de microdureza do aço ABNT 1020 após o roleteamento.

FONTE - Autor.

O perfil de microdureza do corpo de prova de aço ABNT 1020 apenas torneado ($P = 0$, $V = 0$ m/min, $f = 0$ mm/rev e $n = 0$), mostrado na FIGURA 4.10, deixa claro que o próprio processo de torneamento causa uma elevação da microdureza de uma camada próxima à superfície em relação à microdureza do interior dos corpos de prova. Pode-se observar que esse perfil se torna aproximadamente constante e com valor médio em torno de $130 \text{ HV}_{0,2}$ na profundidade de $300 \mu\text{m}$. Portanto, $130 \text{ HV}_{0,2}$ pode ser considerado a microdureza média do material recozido e $300 \mu\text{m}$ a espessura da camada subsuperficial alterada pelo torneamento. Com o roleteamento na condição de $P = 80$ bar, $V = 30$ m/min, $f = 0,04$ mm/rev e $n = 1$ passe, observa-se na FIGURA 4.10 que ocorre um claro aumento dos valores de microdureza da camada subsuperficial até uma profundidade aproximada de $800 \mu\text{m}$, a partir da qual a microdureza se torna aproximadamente constante e próxima de $130 \text{ HV}_{0,2}$. Constata-se, assim, que o roleteamento nessa condição base, de fato, causou uma elevação significativa da microdureza da camada subsuperficial dos corpos de prova e que a

camada subsuperficial deformada plasticamente foi ampliada, atingindo a espessura aproximada de 800 μm .

Em relação à influência da elevação da pressão de roleteamento sobre a microdureza da camada subsuperficial de aço ABNT 1020, que pode ser avaliada na FIGURA 4.10(a), observa-se que a aplicação de uma pressão duas vezes maior (160 bar) causou uma clara elevação da microdureza da camada subsuperficial a partir da profundidade aproximada de 200 μm até ela se tornar aproximadamente constante e muito próxima da microdureza do material bruto na profundidade aproximada de 800 μm , a mesma verificada com 80 bar.

A FIGURA 4.10(b) mostra o efeito da elevação da velocidade de roleteamento sobre a microdureza da camada subsuperficial de aço ABNT 1020 e nela se verifica que o aumento da velocidade para 90 m/min não causa uma alteração significativa da microdureza subsuperficial em relação à encontrada quando se utiliza a velocidade mais baixa de 30 m/min e a profundidade afetada também se mantém inalterada, ficando em torno de 800 μm .

Conforme mostrado na FIGURA 4.10(c), o aumento do avanço de roleteamento de 0,04 para 0,16 mm/rev provocou uma leve elevação dos níveis de microdureza da camada subsuperficial de aço ABNT 1020 até a profundidade de 350 μm , a partir da qual nenhuma diferença consistente é observada em relação à microdureza do material submetido ao avanço mais baixo. A curva de microdureza subsuperficial também indica a manutenção da espessura da camada subsuperficial afetada em torno de 800 μm .

O perfil de microdureza referente à aplicação de cinco passes de roleteamento, apresentado na FIGURA 4.10(d), indica que, com o aumento do número de passes nos corpos de prova de aço ABNT 1020, ocorre uma leve redução da microdureza subsuperficial. Além disso, observa-se que o aumento do número de passes promoveu uma redução da espessura da camada subsuperficial afetada pelo processo de roleteamento para aproximadamente 600 μm .

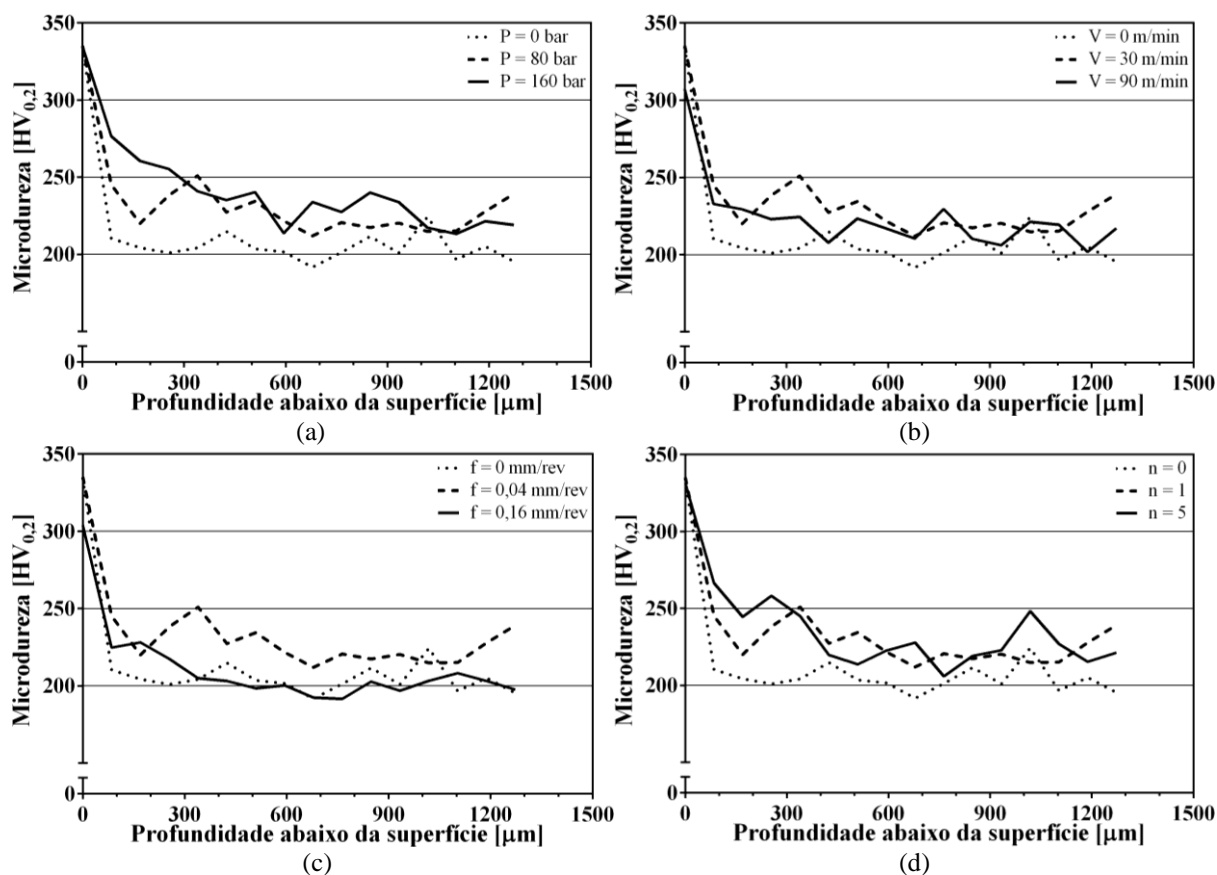


FIGURA 4.11 - Influência da pressão (a), velocidade (b), avanço (c) e número de passes (d) de roleteamento sobre o perfil de microdureza do aço ABNT 1065 após o roleteamento.

FONTE - Autor.

No caso do corpo de prova de aço ABNT 1065 apenas torneado ($P = 0$, $V = 0$ m/min, $f = 0$ mm/rev e $n = 0$), o perfil de microdureza subsuperficial apresentado na FIGURA 4.11 indica que o torneamento causou uma alteração do estado da camada subsuperficial até uma profundidade em torno de $100 \mu\text{m}$, a partir da qual se constata uma clara manutenção da microdureza do material em torno de $200 \text{HV}_{0,2}$, sugerindo que esta corresponde a microdureza do material inalterado pelo processo. Com o roleteamento do corpo de prova de aço ABNT 1065 na condição de $P = 80$ bar, $V = 30$ m/min, $f = 0,04$ mm/rev e $n = 1$ passe, verifica-se que houve um aumento da microdureza ao longo de toda a profundidade abaixo da superfície em que medições foram realizadas. Contudo, como os valores de microdureza ficaram aproximadamente constantes em torno de $220 \text{HV}_{0,2}$ a partir da profundidade aproximada de $600 \mu\text{m}$, pode-se considerar que a profundidade afetada pelo roleteamento nessa condição passou a ser $600 \mu\text{m}$, bastante superior a encontrada no corpo de prova apenas torneado. O fato de que os valores de microdureza ficaram aproximadamente constantes em torno de $220 \text{HV}_{0,2}$ indica que esse valor corresponde à microdureza do núcleo do material

nesse corpo de prova. Uma heterogeneidade na microestrutura dos corpos de prova utilizados pode justificar a pequena diferença entre a microdureza do material bruto desses corpos de prova.

Em relação à influência da elevação da pressão sobre a microdureza da camada subsuperficial de aço ABNT 1065, a FIGURA 4.11(a) indica que o aumento da pressão de 80 para 160 bar causou um claro aumento da microdureza subsuperficial até a profundidade aproximada de 300 μm . A partir desta profundidade, as curvas referentes a essas duas pressões mostram que os valores de microdureza são muito próximos, se tornando aproximadamente constantes na mesma profundidade aproximada de 600 μm .

O aumento da velocidade de roleteamento para 90 m/min nos corpos de prova de aço ABNT 1065, conforme verificado na FIGURA 4.11(b), provocou uma redução da microdureza da camada subsuperficial em relação à encontrada após o roleteamento com 30 m/min. Além disso, com essa mesma velocidade, a camada subsuperficial afetada se tornou menos profunda, atingindo aproximadamente 300 μm .

A avaliação da FIGURA 4.11(c) indica que o aumento do avanço de roleteamento aplicado aos corpos de prova de aço ABNT 1065 de 0,04 para 0,16 mm/rev promoveu uma redução dos valores de microdureza da camada subsuperficial. Além disso, os perfis de microdureza indicam que esse aumento do avanço causou uma redução da profundidade afetada para cerca de 300 μm .

O aumento do número de passes de um para cinco, conforme mostra a FIGURA 4.11(d), levou a uma elevação da microdureza da camada subsuperficial de aço ABNT 1065. Entretanto, observa-se que a camada subsuperficial do corpo de prova submetido a cinco passes apresenta uma espessura afetada aproximadamente igual à do submetido à apenas um passe, cerca de 600 μm .

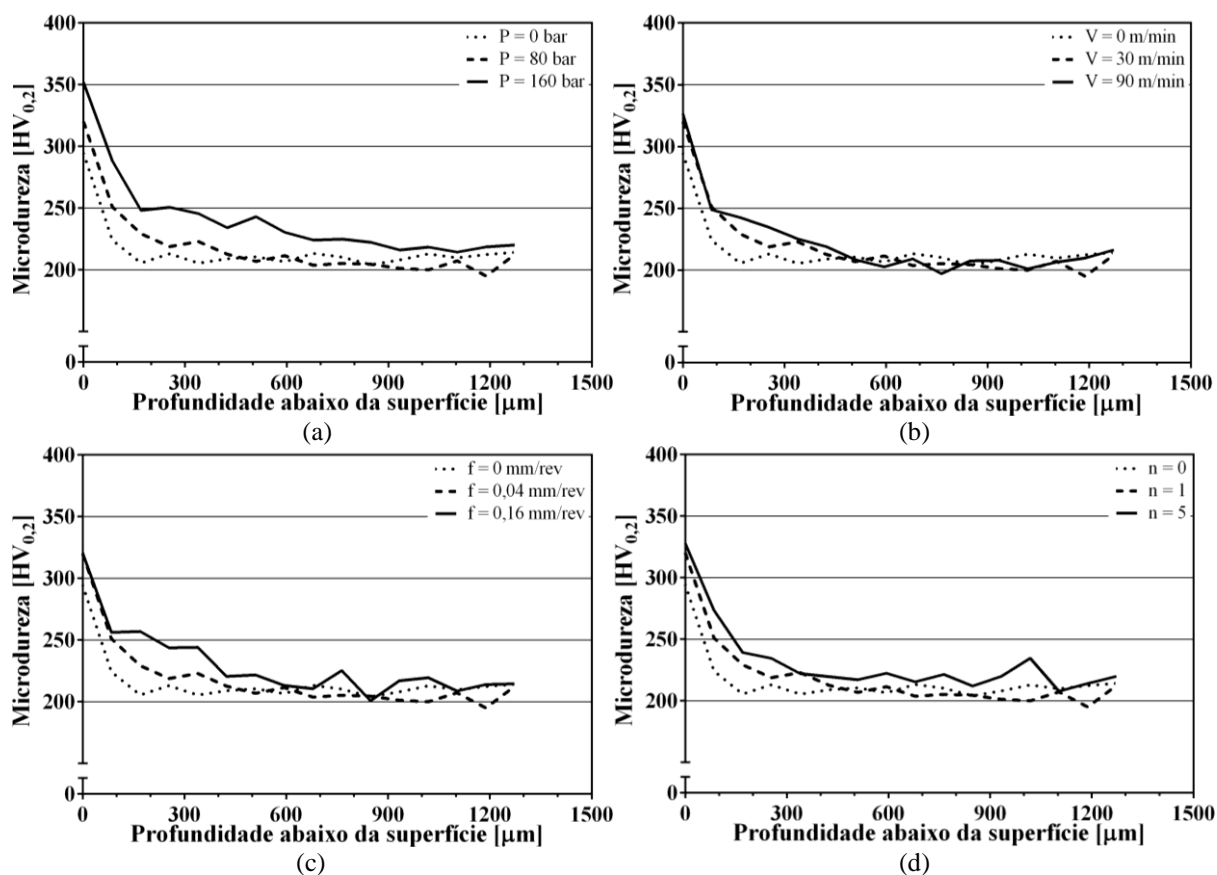


FIGURA 4.12 - Influência da pressão (a), velocidade (b), avanço (c) e número de passes (d) de roleteamento sobre o perfil de microdureza do aço ABNT 1080 após o roleteamento.

FONTE - Autor.

Quando se avalia o perfil de microdureza da camada subsuperficial do corpo de prova de aço ABNT 1080 apenas torneado ($P = 0$, $V = 0$ m/min, $f = 0$ mm/rev e $n = 0$) na FIGURA 4.12, pode-se concluir que o torneamento realizado provocou uma camada subsuperficial alterada com profundidade aproximada de 200 μm . A partir dessa profundidade, observa-se que os valores de microdureza medidos ficam estáveis em torno de 210 HV_{0.2} que, assim, pode ser considerada a microdureza do material não afetado pelo processo. O roleteamento com $P = 80$ bar, $V = 30$ m/min, $f = 0,04$ mm/rev e $n = 1$ passe, por sua vez, provocou um aumento da microdureza e também da profundidade da camada subsuperficial alterada em relação à do corpos de prova apenas torneado, atingindo agora aproximadamente 500 μm .

Em relação à influência da elevação da pressão de roleteamento, é possível verificar na FIGURA 4.12(a) que tanto a microdureza quanto a espessura da camada subsuperficial afetada foram elevadas como resultado do aumento da pressão de 80 para 160

bar. Avaliando-se o perfil de microdureza encontrado no corpo de prova submetido a 160 bar, pode-se estimar que a espessura afetada aumentou para cerca de 900 μm .

O aumento da velocidade de roleteamento de 30 para 90 m/min, por outro lado, conforme exposto na FIGURA 4.12(b), manteve a microdureza da camada subsuperficial aproximadamente constante, o mesmo ocorrendo com a profundidade da camada afetada, que se mantém aproximadamente igual a 500 μm independentemente da velocidade utilizada.

Como pode ser verificado na FIGURA 4.12(c), no caso dos corpos de prova de aço ABNT 1080, o aumento do avanço de roleteamento de 0,04 para 0,16 mm/rev causou uma elevação dos valores de microdureza da camada subsuperficial, porém a profundidade afetada pelo roleteamento com maior avanço se manteve aproximadamente igual a 500 μm .

Em relação à influência do aumento do número de passes de roleteamento sobre a microdureza da camada subsuperficial de aço ABNT 1080, que pode ser analisada na FIGURA 4.12(d), verifica-se que o aumento de um para cinco passes causou um aumento da microdureza da camada subsuperficial, mas manteve a profundidade afetada igual a aproximadamente 500 μm .

As variações dos níveis de microdureza e da profundidade da camada subsuperficial afetada pelo roleteamento dos corpos de prova dos três materiais estudados estão apresentadas na TABELA 4.12 para a comparação do efeito individual da variação da pressão, da velocidade, do avanço e do número de passes entre os materiais.

TABELA 4.12

Variações da microdureza e da profundidade da camada subsuperficial afetada pelo roleteamento dos corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.

Pressão (P) [bar]	Aço ABNT 1020		Aço ABNT 1065		Aço ABNT 1080	
	Microdureza	Profundidade	Microdureza	Profundidade	Microdureza	Profundidade
80	Base	Base (800 μm)	Base	Base (600 μm)	Base	Base (500 μm)
160	↑	-	↑	-	↑	↑ (900 μm)
Velocidade (V) [m/min]	Aço ABNT 1020		Aço ABNT 1065		Aço ABNT 1080	
	Microdureza	Profundidade	Microdureza	Profundidade	Microdureza	Profundidade
30	Base	Base (800 μm)	Base	Base (600 μm)	Base	Base (500 μm)
90	-	-	↓	↓ (300 μm)	-	-
Avanço (f) [mm/rev]	Aço ABNT 1020		Aço ABNT 1065		Aço ABNT 1080	
	Microdureza	Profundidade	Microdureza	Profundidade	Microdureza	Profundidade
0,04	Base	Base (800 μm)	Base	Base (600 μm)	Base	Base (500 μm)
0,16	↑	-	↓	↓ (300 μm)	↑	-
Número de passes (n)	Aço ABNT 1020		Aço ABNT 1065		Aço ABNT 1080	
	Microdureza	Profundidade	Microdureza	Profundidade	Microdureza	Profundidade
1	Base	Base (800 μm)	Base	Base (600 μm)	Base	Base (500 μm)
5	↓	↓ (600 μm)	↑	-	↑	-

FONTE - Autor.

O aumento da microdureza e da profundidade da camada subsuperficial alterada pelo roleteamento com a utilização de pressões maiores e de mais passes pode ser explicada pela indução de deslocações adicionais à camada subsuperficial com o aumento da deformação plástica imposta ao material quando se utiliza cargas mais elevadas ou se aplica a deformação plástica repetidamente, aumentando, assim, o seu encruamento. O aumento da dureza e da profundidade da camada subsuperficial afetada pelo roleteamento foi observado nos trabalhos de Łabanowski e Ossowska (2006), Rodríguez *et al.* (2012) e Prabhu *et al.* (2014) com a elevação da pressão e nos trabalhos de Abrão *et al.* (2014a) e Morimoto (1988) com a elevação da pressão e do número de passes. Em relação à influência do avanço de roleteamento, a redução dos níveis de microdureza e da profundidade afetada na camada subsuperficial do aço ABNT 1065 com a elevação do avanço, situação também observada por Morimoto (1988), pode ser explicada pelo fato de que as regiões da superfície passam a sofrer menos deformação plástica e se tornam menos encruadas, já que a sobreposição entre as marcas das esferas da ferramenta de roleteamento é reduzida. Por outro lado, a queda da microdureza e da profundidade da camada subsuperficial alterada pelo roleteamento com a elevação da velocidade pode ser explicada pela diminuição do tempo de contato entre as esferas da ferramenta e o material durante a operação. A elevação da velocidade de roleteamento provocou uma redução no tempo de duração dos ensaios e, dessa forma, causou uma redução do tempo de contato entre a ferramenta de roleteamento e a superfície dos corpos de prova. Com isto, pode ocorrer uma redução da deformação plástica imposta ao material da camada subsuperficial e, conseqüentemente, uma redução do seu grau de encruamento ao final do processo. Por fim, a redução da microdureza e da profundidade da camada subsuperficial afetada que foi observada no corpo de prova de aço ABNT 1020 com o aumento do número de passes para cinco pode ser explicada por uma maior uniformização das deslocações da camada subsuperficial e também pela ocorrência de descamação da camada subsuperficial visto que esse material possui menor resistência mecânica.

A FIGURA 4.13 apresenta os perfis de microdureza dos três materiais em todas as condições avaliadas (TABELA 3.6) para a comparação direta entre as microdurezas e as profundidades afetadas das camadas subsuperficiais dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.

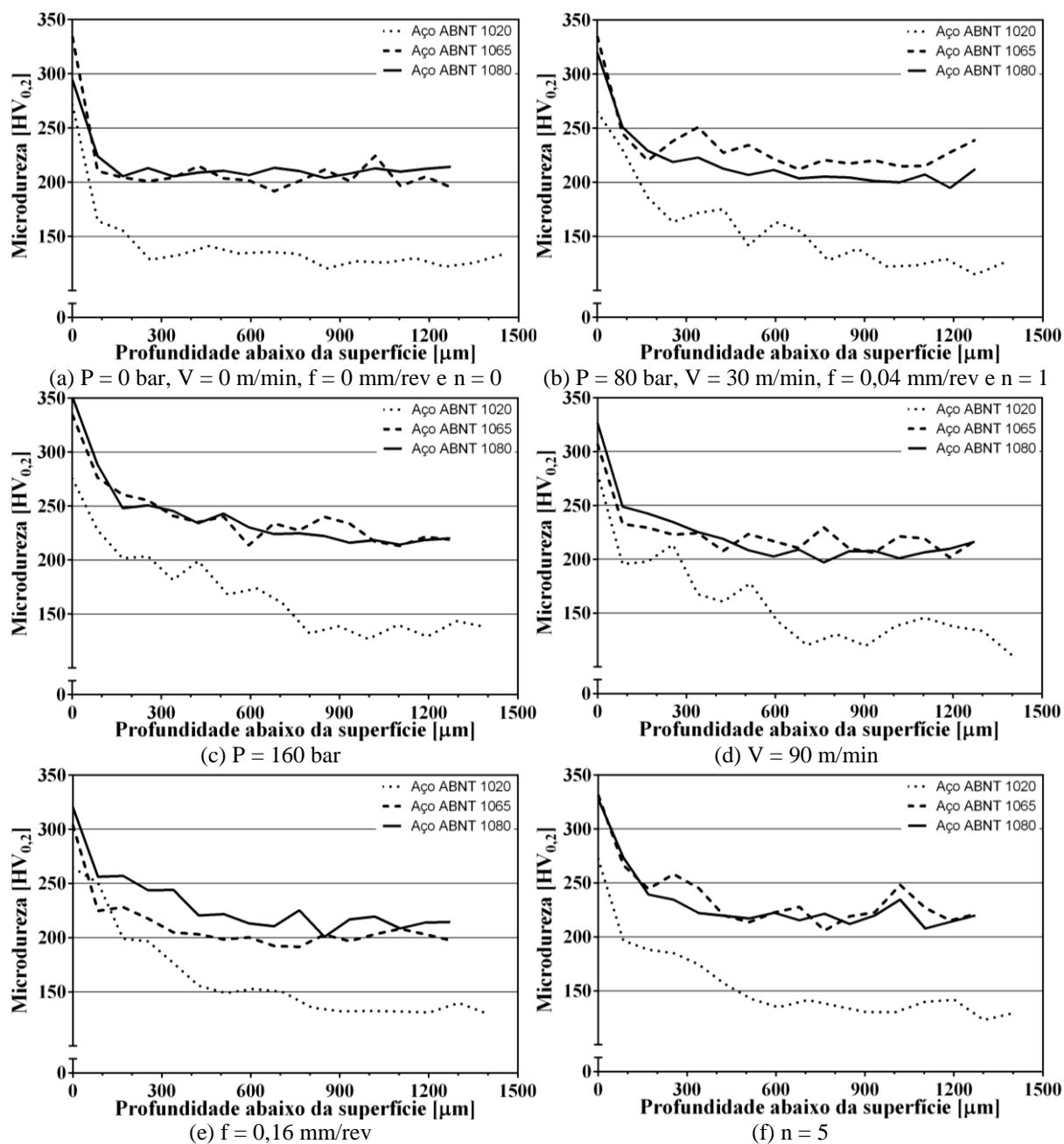


FIGURA 4.13 - Perfis de microdureza da camada subsuperficial dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080 nas condições da TABELA 3.6.

FONTE - Autor.

Avaliando-se a FIGURA 4.13, observa-se que, em geral, as camadas subsuperficiais dos aços ABNT 1065 ou 1080 apresentaram maior dureza, o que é justificado pelo maior limite de escoamento desses materiais em relação ao aço ABNT 1020. Por outro lado, a camada subsuperficial encruada pelo roleteamento, em todas as condições estudadas, apresentou uma profundidade muito maior nos corpos de prova do aço ABNT 1020; situação similar é observada na camada subsuperficial apenas torneada. Como observado por Abrão *et*

al. (2014a), em uma mesma condição de roleteamento, menor resistência mecânica leva a uma maior extensão da deformação plástica na camada subsuperficial. Entre os perfis da camada subsuperficial dos aços ABNT 1065 e 1080, devido às propriedades mecânicas muito próximas, observa-se uma semelhança muito grande antes e após o roleteamento em quase todas as condições, exceção ocorreu no roleteamento com $P = 80$ bar, $V = 30$ m/min, $f = 0,04$ mm/rev e $n = 1$ (FIGURA 4.13b), em que o corpo de prova do aço ABNT 1065 apresentou uma camada subsuperficial consistentemente mais endurecida, e com o avanço elevado para 0,16 mm/rev (FIGURA 4.13e), onde a camada subsuperficial do aço ABNT 1080 mostrou maior profundidade e níveis de microdureza consistentemente mais altos. Isto é coerente com o comportamento divergente da camada subsuperficial desses materiais com a elevação do avanço, verificado na TABELA 4.12.

Em relação aos perfis de microdureza da camada subsuperficial, verificou-se que o valor máximo de dureza ocorreu na superfície, o que não era esperado visto que a tensão máxima de Hertz no contato entre a esfera e a superfície ocorre no interior da camada subsuperficial. Este aparente desacordo pode ser explicado pela distância entre a borda e a primeira medição de microdureza realizada na seção transversal dos corpos de prova deste trabalho que, seguindo as recomendações da norma ASTM E384-11:2011 (ASTM INTERNATIONAL, 2011) apresentadas na FIGURA 3.11, foi de 84,85 μm , valor superior à profundidade da tensão máxima de Hertz na camada subsuperficial e, conseqüentemente, da dureza máxima produzida pela carga mais alta utilizada (referente à pressão de 160 bar). Segundo cálculos baseados em Hutchings e Shipway (2017), Klocke e Liermann (1998) e Röttger (2002 *apud* SARTKULVANICH, 2007), a tensão máxima de Hertz para esta condição situa-se a uma profundidade de 73,26 μm .

4.4 Análise microestrutural

É importante que, após a avaliação da topografia superficial e da dureza da superfície e da camada subsuperficial, a influência do roleteamento sobre a integridade superficial seja complementada por uma análise da microestrutura da camada subsuperficial de corpos de prova submetidos a diferentes condições de pressão, velocidade, avanço e número de passes de roleteamento.

4.4.1 Influência dos parâmetros de roleteamento

Com os resultados da análise metalográfica, avaliou-se a influência do roleteamento sobre a microestrutura da camada subsuperficial de corpos de prova dos três materiais submetidos às condições da TABELA 3.6. A FIGURA 4.14 e a FIGURA 4.15 mostram a microestrutura da camada imediatamente abaixo da superfície de corpos de prova de aço ABNT 1020. A FIGURA 4.16 e a FIGURA 4.17 mostram o mesmo em relação aos corpos de prova de aço ABNT 1065 e a FIGURA 4.18 e a FIGURA 4.19 fazem isso em relação aos corpos de prova de aço ABNT 1080.

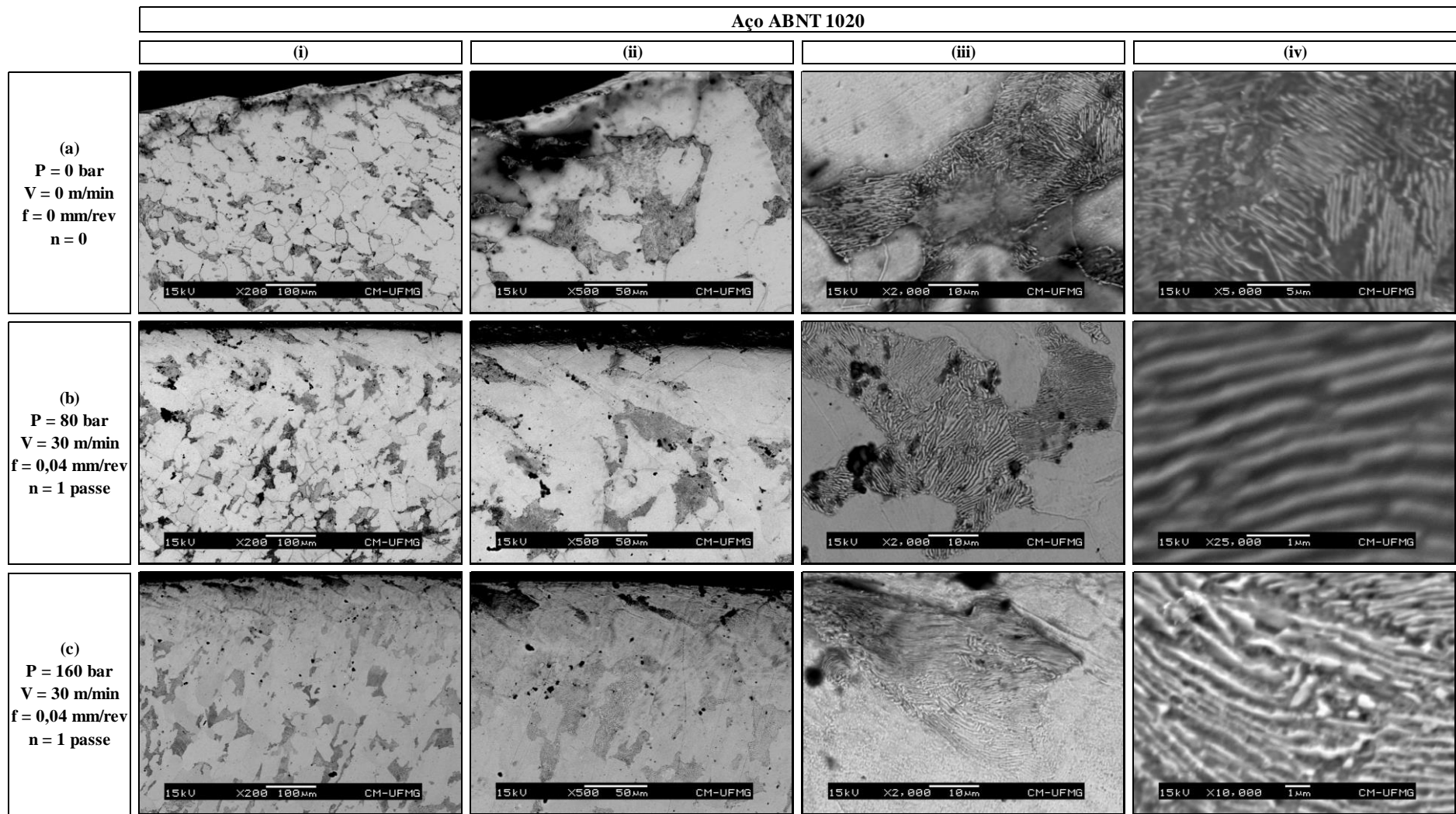


FIGURA 4.14 - Microestrutura da camada subsuperficial de corpos de prova de aço ABNT 1020 submetidos a determinadas condições de roleteamento.

FONTE - Autor.

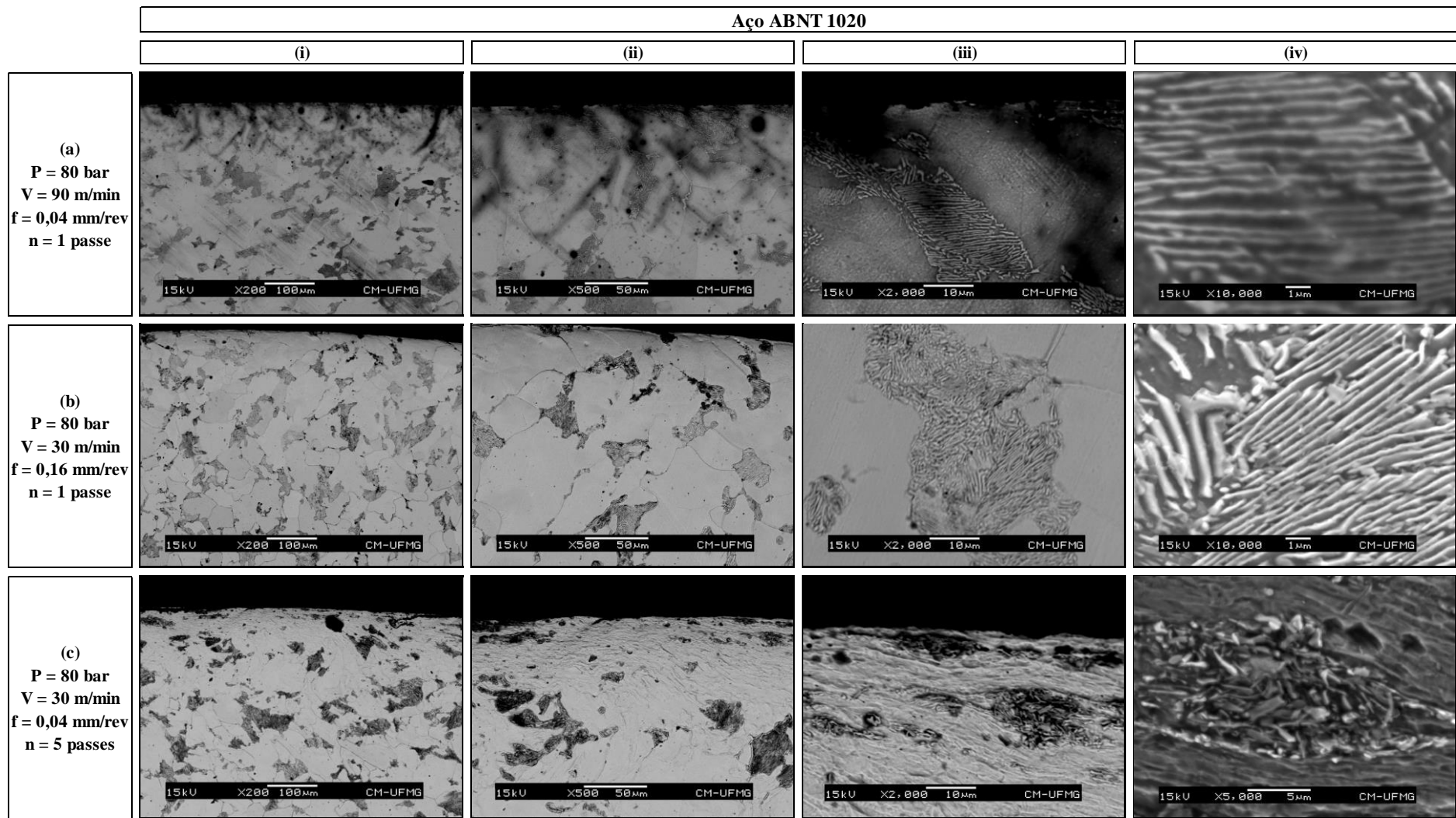


FIGURA 4.15 - Microestrutura da camada subsuperficial de corpos de prova de aço ABNT 1020 submetidos a determinadas condições de roleteamento.

FONTE - Autor.

Na camada subsuperficial do corpo de prova apenas torneado (FIGURA 4.14a), pode-se verificar as marcas de avanço provenientes do torneamento e também que a microestrutura não apresenta sinais de deformação. Após o roleteamento sob pressão de 80 bar, constata-se na FIGURA 4.14(b) uma leve deformação da camada subsuperficial, evidenciada pela ausência das marcas de avanço encontradas na superfície apenas torneada e dos contornos de grão até uma profundidade aproximada de 200 μm . O aumento da pressão para 160 bar, por sua vez, conforme mostrado na FIGURA 4.14(c), causou um aumento mais evidente da deformação da microestrutura, demonstrada principalmente pela perturbação e fratura de lamelas de cementita presentes em uma colônia de perlita da camada subsuperficial.

Comparando-se a FIGURA 4.14(b) com a FIGURA 4.15(a), verifica-se que a elevação da velocidade de roleteamento de 30 para 90 m/min causou uma leve redução da deformação plástica da camada subsuperficial. As colônias de perlita em regiões próximas à superfície se mostram muito semelhantes, porém verifica-se uma definição dos contornos de grão na camada subsuperficial roleteada com 90 m/min que não é observada na roleteada com 30 m/min, situação explicada pela redução da deformação plástica imposta sobre ela.

Em relação ao efeito da elevação do avanço de roleteamento de 0,04 para 0,16 mm/rev, observa-se uma situação muito similar à encontrada com a elevação da velocidade de 30 para 90 m/min. Ao se comparar a FIGURA 4.14(b) com a FIGURA 4.15(b), nenhuma diferença notável é observada entre as estruturas das colônias de perlita com essa variação do avanço, porém, com o avanço de 0,16 mm/rev, a microestrutura da camada subsuperficial possui contornos de grão mais definidos que a roleteada com 0,04 mm/rev, indicando que ela também sofreu menos deformação plástica.

Avaliando-se agora a influência do aumento do número de passes de roleteamento de um para cinco pela análise da FIGURA 4.14(b) e da FIGURA 4.15(c), constata-se que a microestrutura da camada subsuperficial passou a apresentar uma deformação plástica muito mais severa, principalmente até uma profundidade aproximada de 200 μm . As colônias de perlita da camada subsuperficial submetida a cinco passes apresentam uma estrutura fortemente perturbada com as lamelas de cementita muito fraturadas. Além disso, nota-se, comparando a FIGURA 4.14(c) e a FIGURA 4.15(c), que a elevação do número de passes de um para cinco afetou muito mais a deformação plástica da microestrutura da camada subsuperficial do que a elevação da pressão de 80 para 160 bar.

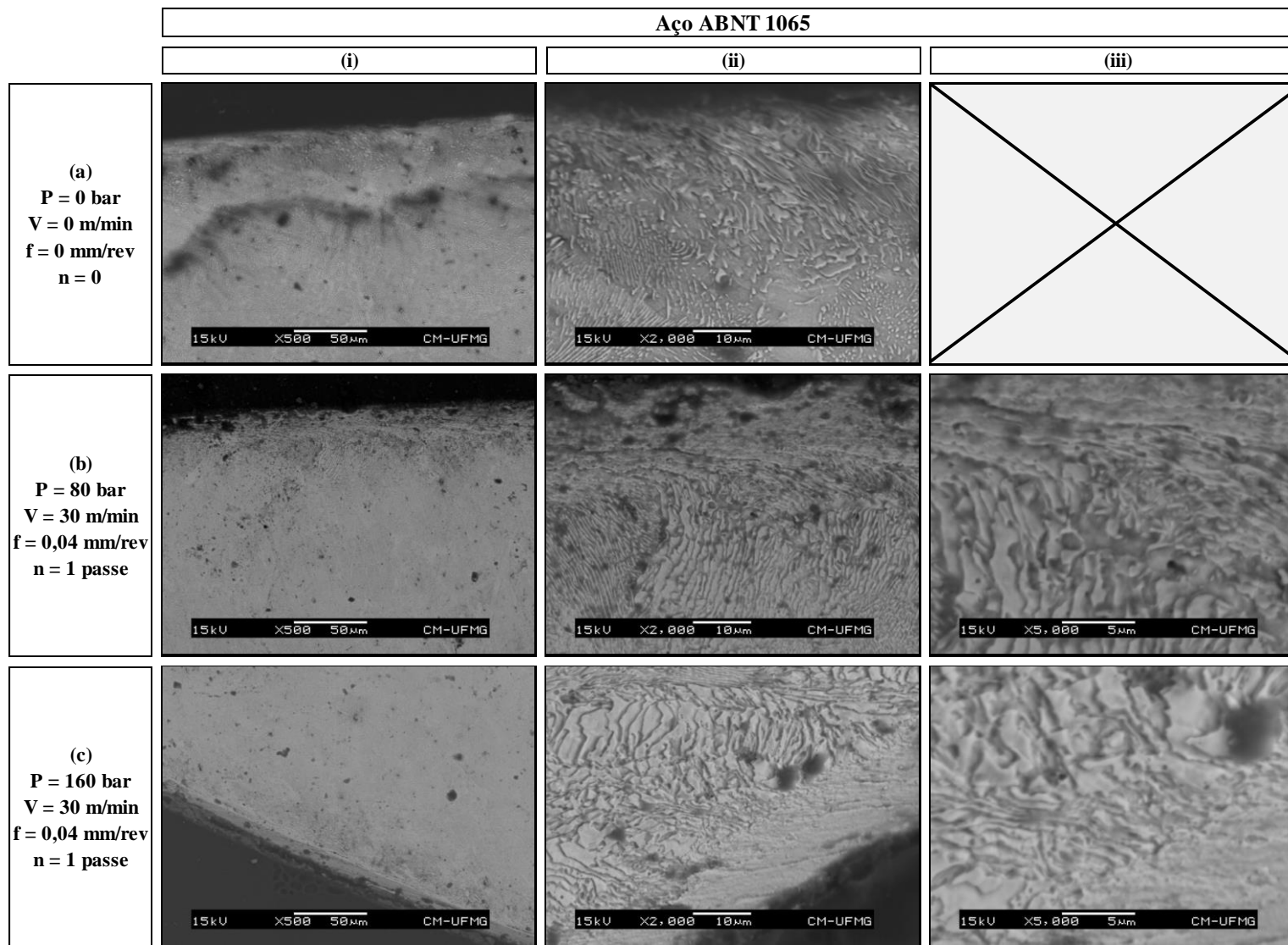


FIGURA 4.16 - Microestrutura da camada subsuperficial de corpos de prova de aço ABNT 1065 submetidos a determinadas condições de roleteamento.

FONTE - Autor.

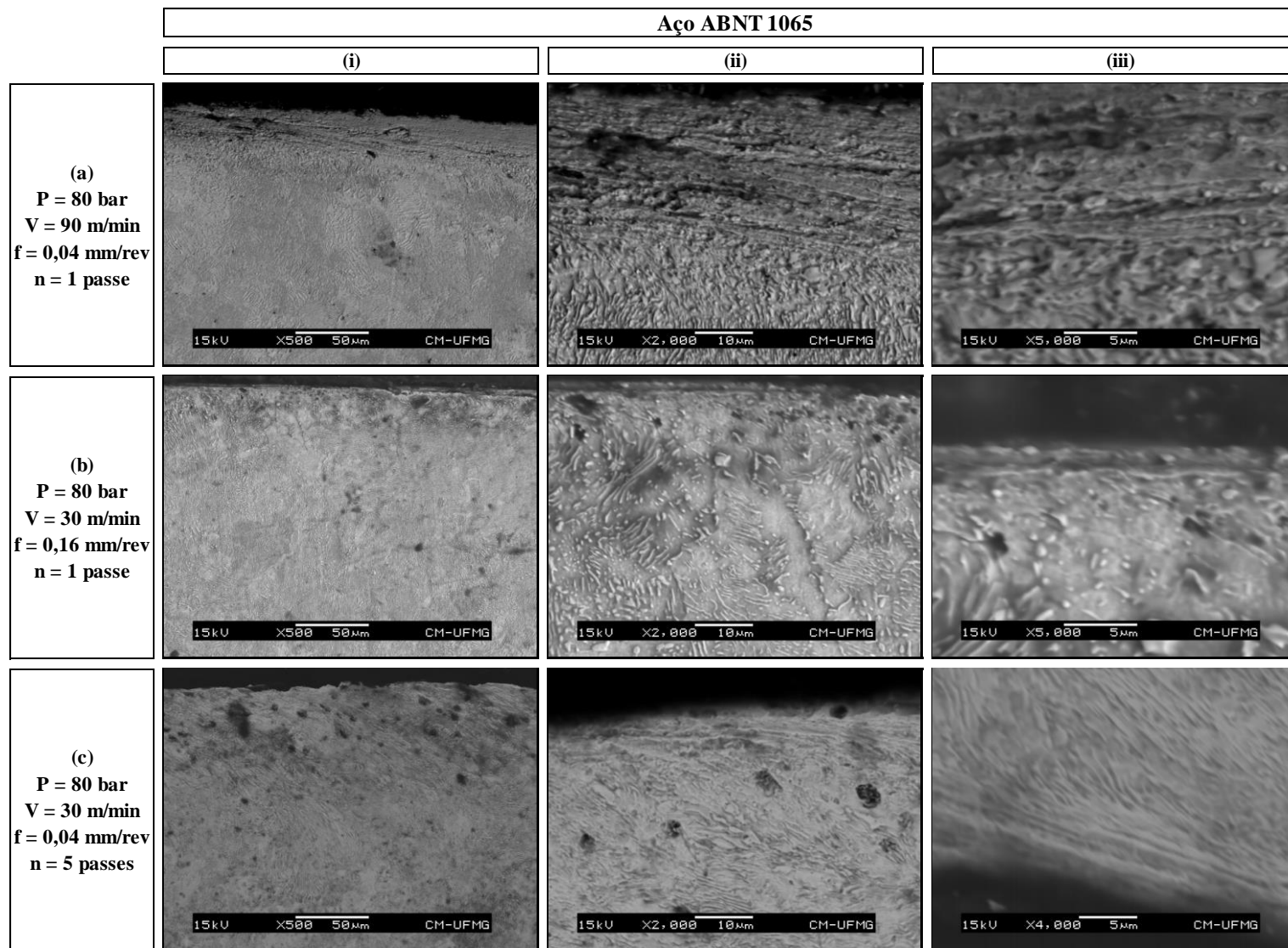


FIGURA 4.17 - Microestrutura da camada subsuperficial de corpos de prova de aço ABNT 1065 submetidos a determinadas condições de roleteamento.

FONTE - Autor.

Na camada subsuperficial do corpo de prova de aço ABNT 1065 apenas torneado (FIGURA 4.16a), a microestrutura apresenta somente uma leve perturbação até cerca de 10 μm de profundidade. Com o roleteamento sob a pressão de 80 bar, verifica-se na FIGURA 4.16(b) que a deformação imposta à camada subsuperficial fez com que a perlita, que compõe a maior parte da microestrutura desse material, fosse transformada em uma estrutura de aparência mais homogênea e uniforme, onde não se verifica de forma nítida a sua característica lamelar, deslocada no sentido da deformação imposta pela ferramenta e com espessura aproximada de 20 μm . Com a utilização da pressão mais elevada (160 bar), porém, a FIGURA 4.16(c) mostra que, apesar da profundidade deformada plasticamente se manter aproximadamente a mesma, essa estrutura deformada se tornou mais homogênea e acentuada, sinal de que houve um aumento da deformação da microestrutura.

Em relação ao efeito da elevação da velocidade de roleteamento de 30 para 90 m/min, pode-se observar, comparando-se a FIGURA 4.16(b) com a FIGURA 4.17(a), que a estrutura deformada da camada subsuperficial tornou-se um pouco menos uniforme e homogênea na condição com velocidade mais alta, indicando uma leve redução da deformação plástica imposta pelo roleteamento, porém a espessura afetada permaneceu aproximadamente inalterada.

Com o aumento do avanço de roleteamento de 0,04 para 0,16 mm/rev, por outro lado, ocorreu uma redução ainda mais evidente da deformação plástica da camada subsuperficial, conforme se verifica ao se comparar a FIGURA 4.16(b) com a FIGURA 4.17(b). Na microestrutura da camada subsuperficial roleteada com 0,16 mm/rev, não foi possível identificar claramente uma estrutura deformada tal qual identificada nas outras condições de roleteamento, apenas se verificou uma microestrutura parcialmente esferoidizada, o que deve estar relacionada a uma variação no material desse corpo de prova e não ao processo de roleteamento.

Apesar de se verificar uma estrutura deformada no sentido do roleteamento, a utilização de cinco passes nos corpos de prova de aço ABNT 1065, como mostrado na FIGURA 4.17(c), levou a uma aparente manutenção da intensidade e extensão da deformação plástica imposta pelo roleteamento com apenas um passe mostrada na FIGURA 4.16(b). Dessa forma, no caso do aço ABNT 1065, a elevação da pressão de roleteamento de 80 para 160 bar apresentou um efeito muito maior sobre a deformação da camada subsuperficial do que a elevação do número de passes de um para cinco. Abrão *et al.* (2014a) também observara uma maior influência da pressão do que do número de passes sobre a deformação da camada subsuperficial de aço AISI 1060.

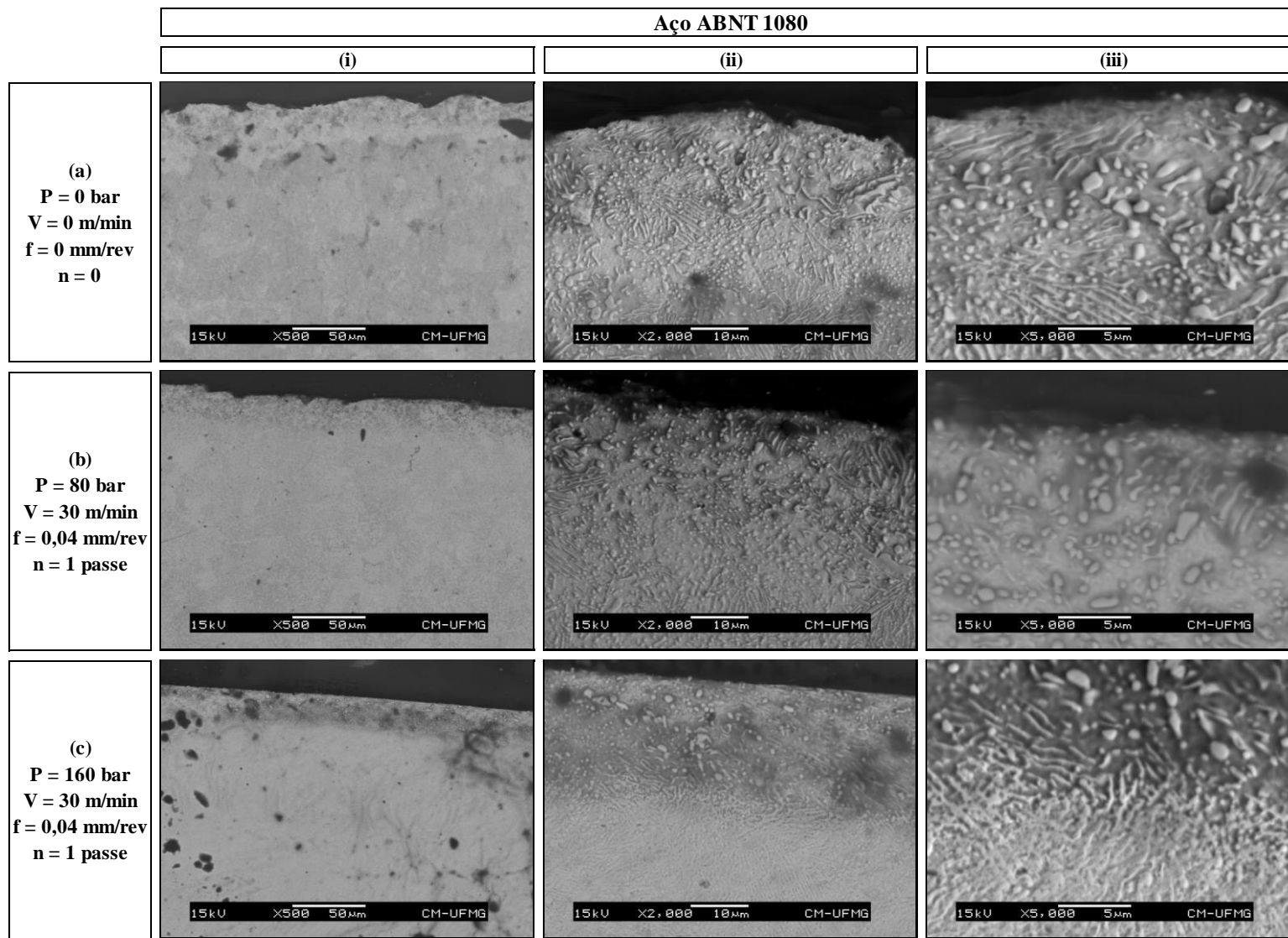


FIGURA 4.18 - Microestrutura da camada subsuperficial de corpos de prova de aço ABNT 1080 submetidos a determinadas condições de roleteamento.

FONTE - Autor.

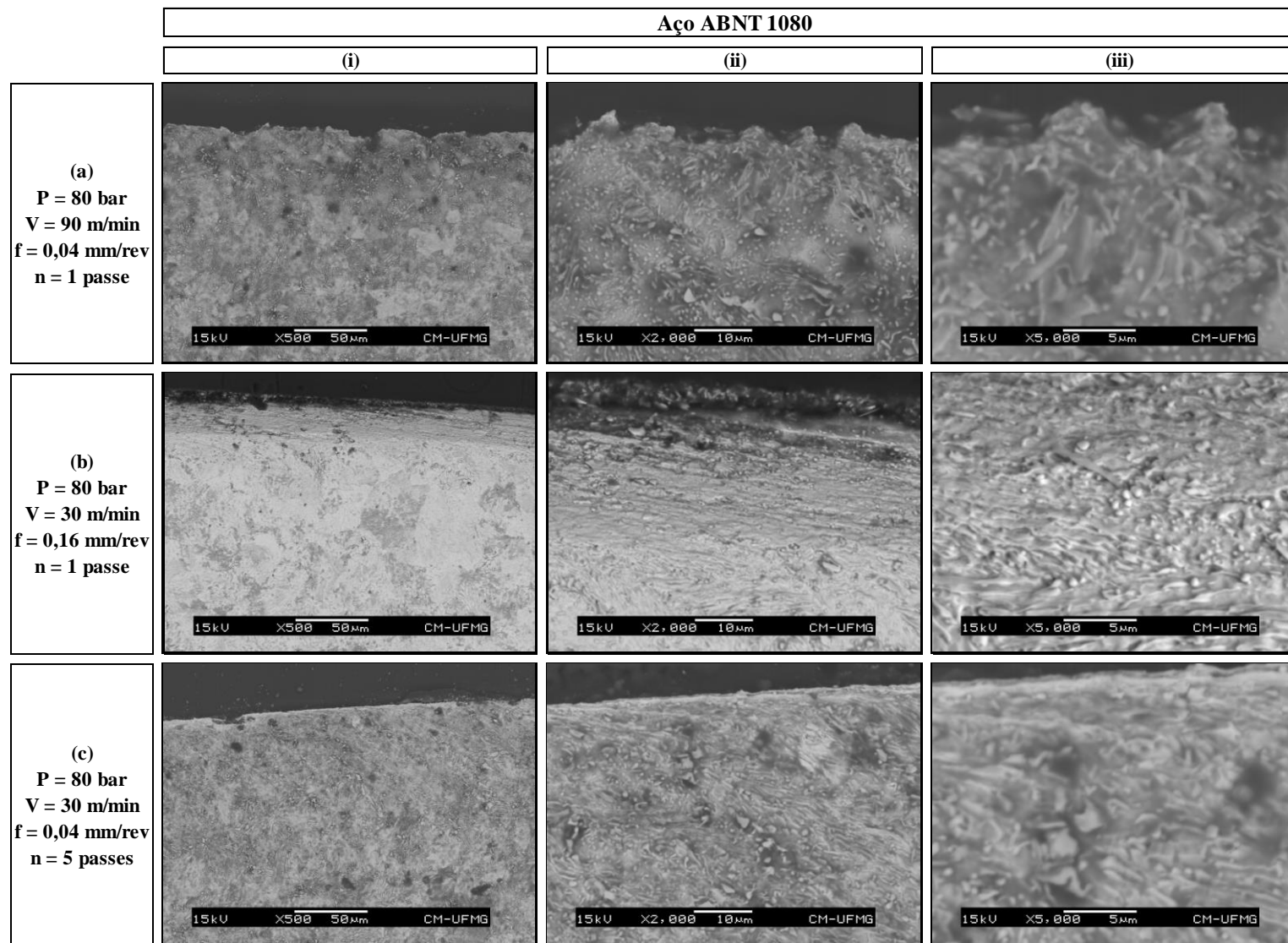


FIGURA 4.19 - Microestrutura da camada subsuperficial de corpos de prova de aço ABNT 1080 submetidos a determinadas condições de roleteamento.

FONTE - Autor.

Observando a FIGURA 4.18, não foi possível identificar a deformação da microestrutura da camada subsuperficial dos corpos de prova de aço ABNT 1080 como resultado do roleteamento com as pressões de 80 ou 160 bar. Entre o corpo de prova apenas torneado ($P = 0$ bar, $V = 0$ m/min, $f = 0$ mm/rev e $n = 0$), vide FIGURA 4.18(a), o roleteado com 80 bar (FIGURA 4.18b) e o roleteado com 160 bar (FIGURA 4.18c), foi notada uma alteração da microestrutura da camada subsuperficial apenas no corpo de prova roleteado com 160 bar, onde observa-se uma estrutura esferoidizada apenas até a profundidade aproximada de 20 μm , a partir da qual se verifica uma estrutura perlítica; nos demais corpos de prova, uma estrutura parcialmente esferoidizada é encontrada em toda a camada subsuperficial observada. Essa alteração, porém, não pode ser associada ao roleteamento, já que, segundo Callister (2001), a esferoidização ocorre por tratamento térmico, ela pode ser explicada por uma variação no estado do material do corpo de prova submetido a 160 bar.

Com relação à influência da elevação da velocidade de roleteamento de 30 para 90 m/min, avaliada ao se comparar FIGURA 4.18(b) com a FIGURA 4.19(a), pode-se afirmar que não houve alteração do estado de deformação da microestrutura da camada subsuperficial.

Com a aplicação de um avanço de roleteamento mais alto (0,16 mm/rev), por sua vez, uma perturbação pode ser verificada em uma região próxima da superfície, conforme mostrado na FIGURA 4.19(b), o que indica que ocorreu um aumento da deformação plástica da camada subsuperficial em relação ao que é observado na camada subsuperficial roleteada com 0,04 mm/rev mostrada na FIGURA 4.18(b).

Avaliando-se a influência do número de passes de roleteamento pela comparação da FIGURA 4.18(b) com a FIGURA 4.19(c), constata-se que a microestrutura da camada subsuperficial resultante do roleteamento com cinco passes não apresenta sinais de deformação plástica, indicando que esse aumento do número de passes não causou uma modificação visível da microestrutura da camada subsuperficial roleteada com apenas um passe.

As variações da deformação plástica da camada subsuperficial resultantes da elevação da pressão, da velocidade, do avanço e do número de passes verificadas nas imagens mostradas estão apresentadas na TABELA 4.13 para sua comparação entre os três materiais estudados.

TABELA 4.13

Variações da deformação plástica da camada subsuperficial afetada pelo roleteamento dos corpos de prova dos aços ABNT 1020, 1065 e 1080.

Pressão (P) [bar]	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
80	Base	Base	Base
160	↑	↑	-
Velocidade (V) [m/min]	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
30	Base	Base	Base
90	↓	↓	-
Avanço (f) [mm/rev]	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
0,04	Base	Base	Base
0,16	↓	↓	↑
Número de passes (n)	Aço ABNT 1020	Aço ABNT 1065	Aço ABNT 1080
1	Base	Base	Base
5	↑	-	-

FONTE - Autor.

O aumento da deformação plástica da camada subsuperficial como resultado do aumento da pressão de 80 para 160 bar é causado pelo aumento da intensidade das tensões de Hertz induzidas pelo roleteamento, visto que estas aumentam com a elevação da intensidade da força normal aplicada no contato (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Esta influência da pressão de roleteamento também foi verificada por Sartkulvanich (2007) e Abrão *et al.* (2014b). Por outro lado, a redução da deformação plástica da camada subsuperficial com o aumento da velocidade de 30 para 90 m/min pode ser justificada pela redução do tempo de contato entre as esferas da ferramenta e a superfície dos corpos de prova. A observada redução da deformação plástica das camadas subsuperficiais dos aços ABNT 1020 e 1065 com o aumento do avanço de roleteamento de 0,04 para 0,16 mm/rev pode ser justificada pela redução da sobreposição da deformação conferida à camada subsuperficial pelas esferas da ferramenta de roleteamento. O surgimento de uma aparente deformação plástica na camada subsuperficial de aço ABNT 1080 com o aumento do avanço de 0,04 para 0,16 mm/rev pode ser uma variação na microestrutura dos corpos de prova avaliados não relacionada ao roleteamento. Em relação à influência da elevação do número de passes de um para cinco sobre o estado de deformação da camada subsuperficial, o aumento da deformação plástica verificado no aço ABNT 1020 pode ser atribuído ao acúmulo da deformação plástica imposta à camada subsuperficial em cada passe da ferramenta. No estudo de Abrão *et al.* (2014b), também foi observado um aumento da deformação plástica com a elevação do número de passes.

Os resultados apresentados também indicam que o aumento do teor de carbono dos aços causa uma redução da intensidade e da extensão da deformação plástica verificada na microestrutura da camada subsuperficial submetida a uma mesma condição de roleteamento, o que pode ser explicado pelo aumento da sua resistência à deformação plástica. Em Abrão *et al.* (2014a) e Blasón *et al.* (2017), observou-se também que nos materiais de maior resistência mecânica (expressa pela sua dureza ou pelo seu limite de escoamento) a camada subsuperficial apresentou menor distorção após o roleteamento.

Os resultados da análise metalográfica das camadas subsuperficiais das amostras dos corpos de prova poderiam ter sido muito melhores caso algumas escolhas diferentes tivessem sido tomadas durante a preparação. A baixa resistência mecânica da resina utilizada no embutimento a frio, além de levar ao surgimento de um pequeno degrau na interseção com o corpo de prova, causando o abaulamento da borda dos corpos de prova e impedindo a adequada visualização da camada subsuperficial por microscopia ótica, fez com que, em algumas regiões, ela se sobrepusesse à camada subsuperficial, dificultando, dessa forma, a identificação da fronteira entre o corpo de prova e a resina, onde seria possível verificar a presença de trincas, por exemplo. Além disso, a presença de partículas da alumina utilizada em uma etapa do polimento aglomeradas na interseção da resina com o corpo de prova, material de difícil remoção, especialmente, em função do degrau existente na região, que facilitou a aglomeração, dificultou a visualização da microestrutura da camada subsuperficial; diversas manchas escuras encontradas nas imagens apresentadas na FIGURA 4.14, na FIGURA 4.15, na FIGURA 4.16, na FIGURA 4.17, na FIGURA 4.18 e na FIGURA 4.19, que prejudicaram a sua qualidade e, conseqüentemente, a avaliação das microestruturas, foram causadas pela presença da alumina sobre a camada subsuperficial. Dessa forma, para uma melhor análise metalográfica da camada subsuperficial, uma recomendação é a utilização de uma resina de alta resistência mecânica, como, por exemplo, a baquelite, que dificulta a formação de uma descontinuidade na interseção com o corpo de prova durante o processo de lixamento e polimento com uma baixa carga normal sobre o corpo de prova. Outra recomendação é de que o polimento não seja feito com solução de alumina, apenas pasta de diamante.

5 CONCLUSÕES

Após a apresentação e a análise dos resultados obtidos neste estudo pode-se concluir que:

- O roleteamento, especialmente com a pressão de 40 bar, reduziu significativamente os parâmetros de amplitude (R_q , R_p e R_v) e funcionais (R_{pk} , R_k e R_{vk}) em praticamente todos os casos. Além disso, o aumento do teor de carbono do aço reduziu a rugosidade obtida com o roleteamento.
- A pressão de roleteamento foi o parâmetro de maior influência sobre o acabamento e seu aumento elevou os parâmetros de rugosidade medidos. Além disso, o aumento do teor de carbono do aço reduziu a influência da pressão sobre o acabamento devido ao aumento da resistência mecânica.
- A velocidade de roleteamento não teve influência significativa sobre o acabamento resultante do roleteamento.
- O aumento do avanço de roleteamento, especialmente para 0,16 mm/rev, avanço superior ao do torneamento prévio (0,15 mm/rev), prejudicou o acabamento em razão da redução da sobreposição das marcas sucessivas das esferas de roleteamento e influenciou mais a deformação dos picos e da região central do perfil de rugosidade do que dos vales. Além disso, a elevação do avanço causou maior prejuízo do acabamento do aço com maior teor de carbono devido a sua maior resistência ao achatamento do perfil.
- Em geral, o aumento do número de passes promoveu o achatamento da superfície e influenciou mais a deformação dos picos e da região central do perfil de rugosidade do que dos vales. Além disso, o número de passes apresentou menor influência sobre o acabamento com o aumento do teor de carbono do aço em razão do aumento da sua resistência mecânica.
- O roleteamento aumentou a microdureza superficial no aço ABNT 1080, situação que pode ser explicada pela introdução de deslocamentos adicionais com a deformação plástica a frio da superfície. Contudo, a microdureza superficial gerada por $P = 80$ bar, $V = 30$ m/min, $f = 0,04$ mm/rev e $n = 1$ foi elevada significativamente apenas com o aumento da pressão para 160 bar.

- Nos aços ABNT 1020 e 1065, o roleteamento promoveu apenas manutenção ou redução significativa da microdureza superficial, o que pode ser explicado pela maior uniformização das deslocções induzidas na superfície pelo torneamento prévio.
- O roleteamento elevou a microdureza e a profundidade da camada subsuperficial afetada. O aumento da concentração de carbono do aço, porém, em geral, elevou a microdureza subsuperficial e reduziu a profundidade afetada devido ao aumento da resistência mecânica.
- Os perfis de microdureza subsuperficial dos aços ABNT 1065 e 1080 foram, em geral, muito semelhantes, o que é justificado pelas propriedades mecânicas muito próximas desses materiais.
- O aumento da pressão de roleteamento elevou a microdureza subsuperficial nos três aços como resultado do aumento do encruamento da camada subsuperficial, porém elevou a profundidade afetada apenas no aço ABNT 1080.
- O aumento da velocidade de roleteamento alterou a microdureza subsuperficial e a profundidade afetada apenas no aço ABNT 1065.
- A elevação do avanço de roleteamento reduziu a microdureza subsuperficial e a profundidade afetada apenas no aço ABNT 1065, explicada pela redução da sobreposição entre as marcas sucessivas das esferas de roleteamento. Nos aços ABNT 1020 e 1080, ocorreu uma pequena elevação da microdureza subsuperficial, enquanto a profundidade afetada se manteve constante.
- O aumento do número de passes de roleteamento aumentou a microdureza subsuperficial nos aços ABNT 1065 e 1080 devido ao aumento do encruamento, enquanto a profundidade afetada ficou inalterada. No aço ABNT 1020, porém, ocorreu uma redução da microdureza e da profundidade da camada subsuperficial afetada.
- A elevação da pressão de roleteamento de 80 para 160 bar aumentou a deformação plástica da camada subsuperficial dos aços ABNT 1020 e 1065. No aço ABNT 1080, por sua vez, não foi constatada nenhuma alteração do estado da camada subsuperficial com a pressão.
- A elevação da velocidade de roleteamento reduziu a deformação plástica da camada subsuperficial dos aços ABNT 1020 e 1065, o que pode ser explicado

por uma redução do tempo de contato entre as esferas e a superfície. Neste caso, porém, não se observou nenhuma variação no aço ABNT 1080.

- A elevação do avanço reduziu a deformação plástica da camada subsuperficial dos aços ABNT 1020 e 1065 em função da redução da sobreposição entre as marcas sucessivas das esferas de roleteamento. Já no aço ABNT 1080, sinais de deformação plástica passaram a ser observados na camada subsuperficial.
- A elevação do número de passes de roleteamento aumentou a deformação plástica da camada subsuperficial apenas no aço ABNT 1020. Nos demais materiais, o estado da camada subsuperficial permaneceu estável.
- A elevação do número de passes de roleteamento causou na camada subsuperficial de aço ABNT 1020 uma deformação plástica muito mais intensa do que a verificada quando se elevou a pressão de roleteamento. O oposto ocorreu com o aço ABNT 1065.
- O aumento da concentração de carbono do aço reduziu a intensidade e a extensão da deformação plástica da camada subsuperficial, explicada pelo aumento da resistência à deformação plástica do material.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando o estudo desenvolvido neste trabalho, algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- Avaliar a interação entre os parâmetros de roleteamento testados (pressão, velocidade, avanço e número de passes) sobre a integridade superficial dos materiais avaliados em termos de rugosidade, microdureza superficial e subsuperficial e microestrutura por meio de um planejamento experimental fatorial completo.
- Medir a tensão residual e a vida em fadiga antes e após o roleteamento sob diversas condições de pressão, velocidade, avanço e número de passes para se avaliar comparativamente o comportamento dos materiais com diferentes concentrações de carbono.
- Medir a temperatura da superfície durante o processo de roleteamento para se analisar a existência ou não de um caráter térmico significativo, e avaliar a densidade de deslocações e o tamanho e a orientação dos grãos do material da camada subsuperficial após o roleteamento sob diferentes condições de pressão, velocidade, avanço e número de passes para se examinar diretamente como a deformação plástica resultante afeta esses aspectos metalúrgicos importantes para o comportamento mecânico do material.

ABSTRACT

Surface integrity refers to a set of characteristics of the surface and subsurface layer that have great influence on the functional performance of mechanical components under conditions of wear, corrosion and fatigue, and is determined by the manufacturing processes employed. Thus, surface treatments are used together with these processes to produce a surface integrity suited to the desired function. Deep rolling is one of the surface treatments that involve cold working of the surface and subsurface layer and the present work addresses the study of the influence of some of its parameters (pressure, speed, feed and number of passes) on certain characteristics of the surface integrity (roughness, surface and subsurface microhardness and microstructure) of AISI 1020, 1065 and 1080 carbon steels. A significant improvement on surface finish was observed after deep rolling, however, an increase in pressure (especially with the reduction of the carbon content) and feed (especially with the increase of the carbon content) caused an increase in roughness. An increase in the number of passes, on the other hand, improved the surface finish in some cases. Regarding the surface microhardness, its increase after deep rolling was only observed in AISI 1080 steel. In addition, under all conditions tested deep rolling promoted an increase in the microhardness of the subsurface layer and in the affected depth in comparison to the specimens subjected to turning alone. However, an increase in pressure further increased the microhardness and the affected depth; an increase in speed reduced or did not change the microhardness and the affected depth and clear trends were not observed with different feed and number of passes. Finally, the microstructural analysis showed that the increase of the carbon content promoted a reduction in the deformation of the subsurface layer caused by deep rolling. Deformation was found to increase in AISI 1020 and 1065 steels with increasing pressure and to reduce with the elevation of speed and feed. The number of passes, on the other hand, affected only the subsurface layer of AISI 1020 steel.

Keywords: *Deep rolling, surface integrity, carbon steel, roughness, microhardness, microstructure.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABBASCHIAN, R.; ABBASCHIAN, L.; REED-HILL, R. E. **Physical metallurgy principles**. 4. ed. Stamford: Cengage Learning, 2008.
2. ABRÃO, A. M. et al. The influence of heat treatment and deep rolling on the mechanical properties and integrity of AISI 1060 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 214, n. 12, p. 3020–3030, 2014a.
3. ABRÃO, A. M. et al. The influence of deep rolling on the surface integrity of AISI 1060 high carbon steel. **Procedia CIRP**, v. 13, p. 31–36, 2014b.
4. ABRÃO, A. M. et al. The inducement of residual stress through deep rolling of AISI 1060 steel and its subsequent relaxation under cyclic loading. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 79, n. 9–12, p. 1939–1947, 2015.
5. AÇOSPORTE. **Aço SAE 1020**. Disponível em: <<http://www.acosporte.com.br/aco-sae-1020>>. Acesso em: 6 ago. 2018.
6. AKKURT, A. Comparison of roller burnishing and other methods of finishing treatment of the surface of openings in parts from tool steel D3 for cold forming. **Metal Science and Heat Treatment**, v. 53, n. 3–4, p. 145–150, 2011.
7. ALTENBERGER, I. et al. Cyclic deformation and near surface microstructures of shot peened or deep rolled austenitic stainless steel AISI 304. **Materials Science and Engineering A**, v. 264, n. 1–2, p. 1–16, 1999.
8. ALTENBERGER, I. Deep rolling - The past, the present and the future. **Proceedings of the 9th International Conference on Shot Peening**, p. 144–155, 2005.
9. ALTENBERGER, I.; SCHOLTES, B. Recent developments in mechanical surface optimization. **Materials Science Forum**, v. 347–349, p. 382–398, 2000.

10. ARCELORMITTAL. **Guia do aço.** Disponível em: <<http://brasil.arcelormittal.com/pdf/quem-somos/guia-aco.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2018.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.** Rio de Janeiro, 2002.
12. ASTAKHOV, V. P. et al. **Surface integrity in machining.** 1. ed. London: Springer-Verlag, 2010.
13. ASTM INTERNATIONAL. **E384-11: Standard test method for Knoop and Vickers hardness of materials.** West Conshohocken, 2011.
14. BANNANTINE, J. A.; COMER, J. J.; HANDROCK, J. L. **Fundamentals of metal fatigue analysis.** 1. ed. Englewood: Prentice Hall, 1989.
15. BAUCCIO, M. L. **ASM Metals reference book.** 3. ed. [s.l.] ASM International, 1993.
16. BLASÓN, S. et al. Fatigue behaviour improvement on notched specimens of two different steels through deep rolling, a surface cold treatment. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 92, p. 223–228, 2017.
17. BRINKSMEIER, E. et al. Nondestructive testing for evaluating surface integrity. **Annals of the CIRP**, v. 33, n. 2, p. 489–509, 1984.
18. CALLISTER, W. D. **Fundamentals of materials science and engineering.** 5. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
19. COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

20. COURTNEY, T. H. **Mechanical behavior of materials**. 2. ed. Long Grove: Waveland Press, Inc., 2005.
21. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. **50125: Testing of metallic materials - Tensile test pieces**. Berlin, 2009.
22. EBERT, L. J. Effects of residual stresses upon design, fabrication and field service. **Proceedings of the Interdisciplinary Workshop for Quantitative Flaw Definition**, n. June, 1974.
23. ECOROLL. **Operating Instruction Nr. 061212E/0**, [s.d.].
24. EL-AXIR, M. H. An investigation into roller burnishing. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 40, n. 11, p. 1603–1617, 2000.
25. ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **Carbon steel handbook**. Palo Alto, 2007.
26. FOX, J. H. E. **An introduction to steel selection: Part 1, carbon and low-alloy steels**. Over Wallop: Oxford University Press, 1979.
27. GAVRILJUK, V. G. Decomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation. **Materials Science and Engineering A**, v. 345, n. 1–2, p. 81–89, 2003.
28. GHARBI, F. et al. Effect of ball burnishing process on the surface quality and microstructure properties of AISI 1010 steel plates. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 20, n. 6, p. 903–910, 2011.
29. HOSFORD, W. F.; CADDELL, R. M. **Metal forming: Mechanics and metallurgy**. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
30. HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: Friction and wear of engineering materials**. 2. ed. Cambridge: Butterworth-Heinemann, 2017.

31. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **6892-1: Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature**. Geneva, 2009.
32. JUIJERM, P.; ALTENBERGER, I. Fatigue performance enhancement of steels using mechanical surface treatments. **Journal of Metals, Materials and Minerals**, v. 17, n. 1, p. 59–65, 2007.
33. KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing engineering and technology**. 6. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2010.
34. KLOCKE, F.; LIERMANN, J. Roller burnishing of hard turned surfaces. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 38, n. 5–6, p. 419–423, 1998.
35. KOSTER, W. P. et al. **Surface integrity of machined structural components**. Cincinnati: Metcut Research Associates Inc, 1970.
36. KUZNETSOV, V. P.; TARASOV, S. Y.; DMITRIEV, A. I. Nanostructuring burnishing and subsurface shear instability. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 217, p. 327–335, 2015.
37. ŁABANOWSKI, J.; OSSOWSKA, A. Influence of burnishing on stress corrosion cracking susceptibility of duplex steel. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 19, n. 1, p. 46–52, 2006.
38. LEE, Y.-L. et al. **Fatigue testing and analysis: Theory and practice**. 1. ed. Burlington: Butterworth–Heinemann, 2005.
39. LOJKOWSKI, W. et al. Nanostructure formation on the surface of railway tracks. **Materials Science and Engineering: A**, v. 303, n. 1–2, p. 197–208, 2001.
40. LUCA, L.; NEAGU-VENTZEL, S.; MARINESCU, I. Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels. **Precision Engineering**, v. 29, n. 2, p. 253–256, 2005.

41. MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2009.
42. MEYER, D.; KÄMMLER, J. Surface integrity of AISI 4140 after deep rolling with varied external and internal loads. **Procedia CIRP**, v. 45, p. 363–366, 2016.
43. MORIMOTO, T. Work hardening and tool surface damage in burnishing. **Wear**, v. 127, n. 2, p. 149–159, 1988.
44. MORO, N. **Elementos de máquinas - Molas**. Florianópolis: Instituto Federal de Santa Catarina, 2015.
45. MURTHY, R. L.; KOTIVEERACHARI, B. Burnishing of metallic surfaces - a review. **Precision Engineering**, v. 3, n. 3, p. 172–179, 1981.
46. NEWCOMB, S. B.; STOBBS, W. M. A transmission electron microscope study of the white etching layer on a rail head. **Materials Science & Engineering A**, v. 66, n. 2, p. 195–204, 1984.
47. PRABHU, P. R. et al. Surface layer alterations in AISI 4140 steel from turn-assisted deep cold rolling process. **Proceedings of the 2nd International Conference on Current Trends in Engineering and Management ICCTEM -2014**, p. 245–250, 2014.
48. RAO, D. S. et al. Investigations on the effect of ball burnishing parameters on surface hardness and wear resistance of HSLA dual-phase steels. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 23, n. 3, p. 295–302, 2008.
49. RODRÍGUEZ, A. et al. Ball burnishing application for finishing sculptured surfaces in multi-axis machines. **International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems**, v. 4, n. 3–4, p. 220, 2011.
50. RODRÍGUEZ, A. et al. Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique. **Surface and Coatings Technology**, v. 206, n. 11–12, p. 2817–2824, 2012.

51. SARTKULVANICH, P. **Determination of material properties for use in FEM simulations of machining and roller burnishing**. Columbus: The Ohio State University, 2007.
52. SAUVAGE, X.; CHBIHI, A.; QUELENNEC, X. Severe plastic deformation and phase transformations. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 240, n. 1, p. 1–8, 2010.
53. SCHULZE, V. **Modern mechanical surface treatment: States, stability, effects**. 1. ed. Weinheim: Wiley-VHC Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006.
54. SEEMIKERI, C. Y.; BRAHMANKAR, P. K.; MAHAGAONKAR, S. B. Investigations on surface integrity of AISI 1045 using LPB tool. **Tribology International**, v. 41, n. 8, p. 724–734, 2008.
55. STOUT, K. J. Engineering surfaces - A philosophy of manufacture (a proposal for good manufacturing practice). **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 212, n. 3, p. 169–174, 1998.
56. UMEMOTO, M.; TODAKA, Y.; TSUCHIYA, K. Formation of nanocrystalline structure in steels by air blast shot peening. **Materials Transactions**, v. 44, n. 7, p. 1488–1493, 2003.
57. WHITEHOUSE, D. J. **Surfaces and their measurement**. 1. ed. London: Hermes Penton Science, 2002.
58. WONG, C. C.; HARTAWAN, A.; TEO, W. K. Deep cold rolling of features on aero-engine components. **Procedia CIRP**, v. 13, p. 350–354, 2014.
59. YEN, Y.-C. **Modeling of metal cutting and ball burnishing: Prediction of tool wear and surface properties**. Columbus: The Ohio State University, 2004.
60. ZHANG, H. W. et al. Microstructural investigation of white etching layer on pearlite steel rail. **Materials Science and Engineering A**, v. 421, n. 1–2, p. 191–199, 2006.

ANEXO A

A.1 Análise química do aço ABNT 1020



Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT
 Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE
 Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Ensaio NBR ISO/IEC 17025

Análise Química por Espectrometria Óptica - Base Ferro
 Chemical Analysis by Optical Spectrometry - Iron Base

Relatório / Report nº 9435/2018

CRL 0126

Solicitante / Requester: Alexandre Mendes Abrão
Endereço / Address: EE.UFMG - Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - Belo Horizonte - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente / Identification by customer: Amostra de Aço ABNT 1020

Elementos Elements	Concentração Concentration	Unidade Unit	Elementos Elements	Concentração Concentration	Unidade Unit
Carbono (C)	0,2209	%	Chumbo (Pb)	ND	%
Silício (Si)	0,1349	%	Estanho (Sn)	0,0012	%
Manganês (Mn)	0,5382	%	Arsênio (As)	0,0050	%
Fósforo (P)	0,0280	%	Zircônio (Zr)	ND	%
Enxofre (S)	0,0056	%	Bismuto (Bi)	ND	%
Cromo (Cr)	0,0159	%	Cálcio (Ca)	ND	%
Molibdênio (Mo)	0,0030	%	Cério (Ce)	ND	%
Níquel (Ni)	ND	%	Antimônio (Sb)	ND	%
Alumínio (Al Total)	0,0112	%	Selênio (Se)	ND	%
Cobalto (Co)	0,0028	%	Tântalo (Ta)	ND	%
Cobre (Cu)	0,0200	%	Boro (B)	ND	%
Nióbio (Nb)	ND	%	Zinco (Zn)	ND	%
Titânio (Ti)	0,0006	%	Lantânio (La)	ND	%
Vanádio (V)	ND	%	Nitrogênio (N)	0,0099	%
Tungstênio (W)	ND	%	Ferro (Fe) Balanço	98,9799	%

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação
This report contain results referred exclusively specimen sent by requester and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.

Informações / Informations:
* Temperatura máxima do laboratório: 28°C / Maximum Temperature of laboratory: 28°C.
Procedimento / Método / Procedure / Method:
* Análise realizada segundo Instrução Técnica IT Lab 249 revisão 09 / Analyses performed by technical instruction IT Lab 249 revision 09.
* Normas: ASTM E 415:2017, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014 / Standards: ASTM E 415:2017, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014.
Observações / Observations:
O equipamento analisa somente os elementos apresentados no quadro deste relatório. A base refere-se ao balanceamento da composição para cem por cento podendo conter outros elementos não detectados / The equipment only analyzes the elements presented in the chart of this report. The base refers to the balance of the composition for hundred percent and may contain other undetected elements.
* Onde consta ND (Não Detectado), significa que o resultado do elemento está abaixo do limite inferior da faixa de detecção do equipamento e NQ (Não Quantificado) está acima do limite superior da faixa de detecção do equipamento / Where reported ND (Not Detected), the result means that the element is below the lower limit of the detection range of equipment and NQ (Not Quantified) is above the upper limit of the detection range of the equipment.

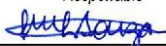


Relatório / Report nº 9435/2018

Equipamento utilizado / Equipment used:
* Método utilizado - Espectrometria de Emissão Ótica / Method used - Optical emission spectrometry.
Equipamentos / Instruments / Equipment / Instruments:
* Espectrômetro de Emissão Ótica SPECTROMAXx identificação 159239, calibrado pelo fabricante / Optical emission spectrometer Spectromaxx, identification 159239, calibrated by manufacturer.

Incerteza de Medição / Measurement Uncertainty			
Elemento Element	+/- U 95% / Uncertainty	Fator de Abrangência Coverage factor (K)	Graus de Liberdade Degrees of freedom V _{eff}
C	0,0090	2,11	25,379
Si	0,0128	2	infinito
Mn	0,0023	2	infinito
P	0,0083	2	infinito
S	0,0019	2,06	39,464
Cr	0,0051	2,23	12,014
Mo	0,0101	2,25	11,678
Ni	0,0088	2,15	18,503
Al t	0,0032	2,05	57,907
Co	0,0032	2	infinito
Cu	0,0041	2,05	58,736
Nb	0,0063	2,14	19,18
Ti	0,0068	2,25	11,942
V	0,0025	2,16	17,034
W	0,0124	2	infinito
Pb	0,0007	2	infinito
Sn	0,0014	2,05	50,671
As	0,0056	2,2	14,54
Zr	0,0026	2,02	103,238
Bi	0,0006	2,13	42,46
Ca	0,0002	2	infinito
Ce	0,0002	2	infinito
Sb	0,0024	2	infinito
Se	0,0014	2,05	58,273
Ta	0,0042	2,15	18,171
B	0,0003	2,02	183,64
Zn	0,0002	2	infinito
La	0,0002	2,05	68,598
N	0,0019	2,11	23,62

* Esta foi a maior incerteza encontrada e foi obtida através da multiplicação da incerteza de medição combinada pelo fator de abrangência K (coeficiente de segurança), proporcionando um nível de confiança de aproximadamente de 95% / This is the bigger uncertainty found and was obtained through for multiplication for measurement uncertainty combined by the coverage factor K (safety factor), providing a level by safety approximately 95%.

Recepção / Reception	29/08/18	Analista Analyst	Responsável Responsible
Realização / Achievement	31/08/18	Jorge Henrique Queiroz Ferreira Laboratorista Técnico	
Emissão / Emission	31/08/18		Patrícia Resende Laboratorista-CRQ 02102194-2ºR
Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D			

SENAI Itáuna CETEF Marcelino Corradi
Rua Lília Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270
Itáuna - MG - Fone: (37) 3249-2400
Página 2 de 2

A.2 Análise química do aço ABNT 1065



Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT
 Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE
 Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Análise Química por Espectrometria Óptica - Base Ferro
 Chemical Analysis by Optical Spectrometry - Iron Base

Relatório / Report nº 9436/2018

Ensaios NBR ISO/IEC 17025
 CRL 0126

Solicitante / Requester: Alexandre Mendes Abrão
Endereço / Address: EE.UFMG - Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - Belo Horizonte - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente Amostra de Aço ABNT 1065
Identification by customer:

Elementos Elements	Concentração Concentration	Unidade Unit	Elementos Elements	Concentração Concentration	Unidade Unit
Carbono (C)	0,6352	%	Chumbo (Pb)	ND	%
Silício (Si)	0,2420	%	Estanho (Sn)	0,0027	%
Manganês (Mn)	0,7944	%	Arsênio (As)	0,0064	%
Fósforo (P)	0,0206	%	Zircônio (Zr)	ND	%
Enxofre (S)	0,0104	%	Bismuto (Bi)	ND	%
Cromo (Cr)	0,0240	%	Cálcio (Ca)	ND	%
Molibdênio (Mo)	0,0040	%	Céριο (Ce)	ND	%
Níquel (Ni)	0,0017	%	Antimônio (Sb)	ND	%
Alumínio (Al Total)	0,0097	%	Selênio (Se)	ND	%
Cobalto (Co)	0,0018	%	Tântalo (Ta)	ND	%
Cobre (Cu)	0,0243	%	Boro (B)	ND	%
Nióbio (Nb)	ND	%	Zinco (Zn)	ND	%
Titânio (Ti)	0,0012	%	Lantânio (La)	ND	%
Vanádio (V)	ND	%	Nitrogênio (N)	0,0063	%
Tungstênio (W)	ND	%	Ferro (Fe) Balanço	98,1941	%

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação
This report contain results refered exclusively specimen sent by requester and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.

Informações / Informations:
* Temperatura máxima do laboratório: 28°C / Maximum Temperature of laboratory: 28°C.
Procedimento / Método / Procedure / Method:
* Análise realizada segundo Instrução Técnica IT Lab 249 revisão 09 / Analyses performed by technical instruction IT Lab 249 revision 09.
* Normas: ASTM E 415:2017, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014 / Standards: ASTM E 415:2017, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014.
Observações / Observations:
O equipamento analisa somente os elementos apresentados no quadro deste relatório. A base refere-se ao balanceamento da composição para cem por cento podendo conter outros elementos não detectados / The equipment only analyzes the elements presented in the chart of this report. The base refers to the balance of the composition for hundred percent and may contain other undetected elements.
* Onde consta ND (Não Detectado), significa que o resultado do elemento está abaixo do limite inferior da faixa de detecção do equipamento e NQ (Não Quantificado) está acima do limite superior da faixa de detecção do equipamento / Where reported ND (Not Detected), the result means that the element is below the lower limit of the detection range of equipment and NQ (Not Quantified) is above the upper limit of the detection range of the equipment.

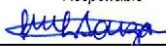


Relatório / Report nº 9436/2018

Equipamento utilizado / Equipment used:
* Método utilizado - Espectrometria de Emissão Ótica / Method used - Optical emission spectrometry.
Equipamentos / Instruments / Equipment / Instruments:
* Espectrômetro de Emissão Ótica SPECTROMAXx identificação 159239, calibrado pelo fabricante / Optical emission spectrometer Spectromaxx, identification 159239, calibrated by manufacturer.

Incerteza de Medição / Measurement Uncertainty			
Elemento Element	+/- U 95% / Uncertainty	Fator de Abrangência Coverage factor (K)	Graus de Liberdade Degrees of freedom V _{eff}
C	0,0090	2,11	25,379
Si	0,0128	2	infinito
Mn	0,0023	2	infinito
P	0,0083	2	infinito
S	0,0019	2,06	39,464
Cr	0,0051	2,23	12,014
Mo	0,0101	2,25	11,678
Ni	0,0088	2,15	18,503
Al t	0,0032	2,05	57,907
Co	0,0032	2	infinito
Cu	0,0041	2,05	58,736
Nb	0,0063	2,14	19,18
Ti	0,0068	2,25	11,942
V	0,0025	2,16	17,034
W	0,0124	2	infinito
Pb	0,0007	2	infinito
Sn	0,0014	2,05	50,671
As	0,0056	2,2	14,54
Zr	0,0026	2,02	103,238
Bi	0,0006	2,13	42,46
Ca	0,0002	2	infinito
Ce	0,0002	2	infinito
Sb	0,0024	2	infinito
Se	0,0014	2,05	58,273
Ta	0,0042	2,15	18,171
B	0,0003	2,02	183,64
Zn	0,0002	2	infinito
La	0,0002	2,05	68,598
N	0,0019	2,11	23,62

* Esta foi a maior incerteza encontrada e foi obtida através da multiplicação da incerteza de medição combinada pelo fator de abrangência K (coeficiente de segurança), proporcionando um nível de confiança de aproximadamente de 95% / This is the bigger uncertainty found and was obtained through for multiplication for measurement uncertainty combined by the coverage factor K (safety factor), providing a level by safety approximately 95%.

Recepção / Reception	29/08/18	Analista Analyst	Responsável Responsible
Realização / Achievement	31/08/18	Jorge Henrique Queiroz Ferreira Laboratorista Técnico	
Emissão / Emission	31/08/18		Patrícia Resende Laboratorista-CRQ 02102194-2ºR
Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D			

SENAI Itáuna CETEF Marcelino Corradi
Rua Lília Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270
Itáuna - MG - Fone: (37) 3249-2400
Página 2 de 2

A.3 Análise química do aço ABNT 1080



Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT
 Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE
 Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Ensaios
 NBR ISO/IEC
 17025

Análise Química por Espectrometria Óptica - Base Ferro
 Chemical Analysis by Optical Spectrometry - Iron Base

Relatório / Report nº 9437/2018

CRL 0126

Solicitante / Requester: Alexandre Mendes Abrão
Endereço / Address: EE.UFMG - Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - Belo Horizonte - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente Amostra de Aço ABNT 1080
Identification by customer:

Elementos Elements	Concentração Concentration	Unidade Unit	Elementos Elements	Concentração Concentration	Unidade Unit
Carbono (C)	0,8071	%	Chumbo (Pb)	ND	%
Silício (Si)	0,2168	%	Estanho (Sn)	0,0018	%
Manganês (Mn)	0,8185	%	Arsênio (As)	0,0059	%
Fósforo (P)	0,0155	%	Zircônio (Zr)	ND	%
Enxofre (S)	0,0082	%	Bismuto (Bi)	ND	%
Cromo (Cr)	0,2295	%	Cálcio (Ca)	ND	%
Molibdênio (Mo)	0,0028	%	Céριο (Ce)	ND	%
Níquel (Ni)	ND	%	Antimônio (Sb)	ND	%
Alumínio (Al Total)	0,0096	%	Selênio (Se)	ND	%
Cobalto (Co)	0,0023	%	Tântalo (Ta)	ND	%
Cobre (Cu)	0,0059	%	Boro (B)	ND	%
Nióbio (Nb)	ND	%	Zinco (Zn)	ND	%
Titânio (Ti)	0,0014	%	Lantânio (La)	ND	%
Vanádio (V)	ND	%	Nitrogênio (N)	0,0103	%
Tungstênio (W)	ND	%	Ferro (Fe) Balanço	97,8418	%

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação
This report contain results referred exclusively specimen sent by requester and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.

Informações / Informations:
* Temperatura máxima do laboratório: 28°C / Maximum Temperature of laboratory: 28°C.
Procedimento / Método / Procedure / Method:
* Análise realizada segundo Instrução Técnica IT Lab 249 revisão 09 / Analyses performed by technical instruction IT Lab 249 revision 09.
* Normas: ASTM E 415:2017, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014 / Standards: ASTM E 415:2017, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014.
Observações / Observations:
O equipamento analisa somente os elementos apresentados no quadro deste relatório. A base refere-se ao balanceamento da composição para cem por cento podendo conter outros elementos não detectados / The equipment only analyzes the elements presented in the chart of this report. The base refers to the balance of the composition for hundred percent and may contain other undetected elements.
* Onde consta ND (Não Detectado), significa que o resultado do elemento está abaixo do limite inferior da faixa de detecção do equipamento e NQ (Não Quantificado) está acima do limite superior da faixa de detecção do equipamento / Where reported ND (Not Detected), the result means that the element is below the lower limit of the detection range of equipment and NQ (Not Quantified) is above the upper limit of the detection range of the equipment.

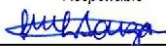


Relatório / Report nº 9437/2018

Equipamento utilizado / Equipment used:
* Método utilizado - Espectrometria de Emissão Ótica / Method used - Optical emission spectrometry.
Equipamentos / Instruments / Equipment / Instruments:
* Espectrômetro de Emissão Ótica SPECTROMAXx identificação 159239, calibrado pelo fabricante / Optical emission spectrometer Spectromaxx, identification 159239, calibrated by manufacturer.

Incerteza de Medição / Measurement Uncertainty			
Elemento Element	+/- U 95% / Uncertainty	Fator de Abrangência Coverage factor (K)	Graus de Liberdade Degrees of freedom V _{eff}
C	0,0090	2,11	25,379
Si	0,0128	2	infinito
Mn	0,0023	2	infinito
P	0,0083	2	infinito
S	0,0019	2,06	39,464
Cr	0,0051	2,23	12,014
Mo	0,0101	2,25	11,678
Ni	0,0088	2,15	18,503
Al t	0,0032	2,05	57,907
Co	0,0032	2	infinito
Cu	0,0041	2,05	58,736
Nb	0,0063	2,14	19,18
Ti	0,0068	2,25	11,942
V	0,0025	2,16	17,034
W	0,0124	2	infinito
Pb	0,0007	2	infinito
Sn	0,0014	2,05	50,671
As	0,0056	2,2	14,54
Zr	0,0026	2,02	103,238
Bi	0,0006	2,13	42,46
Ca	0,0002	2	infinito
Ce	0,0002	2	infinito
Sb	0,0024	2	infinito
Se	0,0014	2,05	58,273
Ta	0,0042	2,15	18,171
B	0,0003	2,02	183,64
Zn	0,0002	2	infinito
La	0,0002	2,05	68,598
N	0,0019	2,11	23,62

* Esta foi a maior incerteza encontrada e foi obtida através da multiplicação da incerteza de medição combinada pelo fator de abrangência K (coeficiente de segurança), proporcionando um nível de confiança de aproximadamente de 95% / This is the bigger uncertainty found and was obtained through for multiplication for measurement uncertainty combined by the coverage factor K (safety factor), providing a level by safety approximately 95%.

Recepção / Reception	29/08/18	Analista Analyst	Responsável Responsible
Realização / Achievement	31/08/18	Jorge Henrique Queiroz Ferreira Laboratorista Técnico	
Emissão / Emission	31/08/18		Patrícia Resende Laboratorista-CRQ 02102194-2ºR
Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D			

SENAI Itáuna CETEF Marcelino Corradi
Rua Lília Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270
Itáuna - MG - Fone: (37) 3249-2400
Página 2 de 2