

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE-3M

COMPARATIVO ENTRE O FIO MÁQUINA PRODUZIDO COM AÇO SAE 1005 E
SAE 1405 MODIFICADOS PARA PRODUÇÃO DE ARAMES RECOZIDOS

Ricardo Adornes Rodrigues

Dissertação para obtenção do título de
Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia

Porto Alegre
2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE-3M

COMPARATIVO ENTRE O FIO MÁQUINA PRODUZIDO COM AÇO SAE 1005 E
SAE 1405 MODIFICADOS PARA PRODUÇÃO DE ARAMES RECOZIDOS

RICARDO ADORNES RODRIGUES
Engenheiro de Controle e Automação

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais – PPGE-3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia

Porto Alegre
2012

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Wagner Viana Bielefeldt
Prof. Dr. Toni Roger Schifelbain de Lima
Prof. Dr. Carlos Otávio Damas Martins

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGE-3M

Porto Alegre, 13 de Março de 2012

Dedico essa dissertação a minha família e em especial a minha esposa Christine e minha
filha Martina.

AGRADECIMENTOS

À Gerdau pela oportunidade de cursar o Mestrado Profissional e ao mesmo tempo exercitar os conhecimentos adquiridos no próprio local de trabalho, gerando conhecimento e resultados para a organização.

Aos colegas da Gerdau pela motivação e auxílio técnico na realização dos testes e avaliação dos resultados.

Ao professor Afonso Reguly pela paciência e persistência para que o trabalho fosse finalizado.

A minha esposa pelas incansáveis noites em que me apoiou com palavras de motivação.

A minha família que creditou em mim a sua confiança e alegria pela conclusão da pós-graduação.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo.....	1
1.2. Justificativa.....	2
1.3. Delimitações do Trabalho	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Processo de Laminação	4
2.2. Principais Equipamentos de Laminação	5
2.2.1. Fornos de Reaquecimento	6
2.2.2. Gaiolas de Laminação.....	8
2.2.3. Acionamento das Gaiolas.....	9
2.2.4. Dispositivos de Transferência e Manipulação do Material.....	10
2.2.5. Tesouras para Corte do Material	11
2.2.6. Leito de Resfriamento.....	11
2.2.7. Formador de Rolos	12
2.3. Matérias-Primas e Produtos.....	13
2.4. Fluxo do processo de laminação.....	13
2.5. Carepa	15
2.6. Processo de Trefilação	16
2.6.1. Matéria-Prima.....	17
2.6.2. Preparação da Superfície.....	18
2.6.3. Trefilação	19
2.7. Arames Recozidos	20
2.7.1. Recozimento.....	20
2.8. Mecanismos de Endurecimento em Metais.....	21
2.8.1. Endurecimento por Refino de Grão.....	22
2.8.2. Endurecimento pela Formação de Solução Sólida	23
2.8.3. Endurecimento por Encruamento	24

2.8.4.	Endurecimento por Partículas de Segunda Fase.....	25
2.8.5.	Endurecimento por Transformação de Fase (Martensita).....	25
2.9.	Taxas de Resfriamento.....	26
3.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	27
3.1.	Metodologia.....	27
3.2.	Materiais.....	28
3.3.	Equipamentos.....	28
3.3.1.	Forno de Reaquecimento.....	28
3.3.2.	Laminador.....	29
3.4.	Amostragem para Caracterização Inicial.....	29
3.4.1.	Amostragem para Caracterização das Propriedades Mecânicas dos Materiais	29
3.4.2.	Amostragem para Teste da Alteração de Parâmetros no Laminador com o	
	Aço SAE 1005 Modificado.....	30
3.5.	Coleta de Dados.....	31
3.6.	Ensaio em Geral.....	31
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4.1.	Caracterização do FM 5,50mm SAE 1405 modificado.....	33
4.2.	Caracterização do FM 5,50mm SAE 1005 Modificado.....	37
4.3.	Comparativo entre o Limite de Resistência e a Temperatura no Formador de	
	Espiras para o FM 5,50mm SAE 1005 modificado.....	42
4.4.	Condição Experimental 1 – 50% Água nas Zonas de Resfriamento.....	43
4.5.	Condição Experimental 2 – 0% de Água nas Zonas de Resfriamento.....	49
4.6.	Comparativo do FM 5,50mm SAE 1005 Modificado nas Condições Padrão,	
	Experimental 1 e Experimental 2.....	55
4.7.	Resumo dos Resultados.....	61
5.	CONCLUSÕES.....	64
6.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	65
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Representação esquemática do conceito de laminação (GERDAU 2002).	4
Figura 2.2	Representação esquemática em planta de um Forno Rotativo (GERDAU 2001).....	6
Figura 2.3	Representação esquemática de um Forno Contínuo tipo Empurrador (GERDAU 2001).....	7
Figura 2.4	Representação esquemática de gaiolas de laminação: a) tipo Convencional; b) tipo Housingless (GERDAU 2002).....	9
Figura 2.5	Representação esquemática de um acionamento para gaiolas de laminação (GERDAU 2002).....	9
Figura 2.6	Representação esquemática dos dispositivos de transferência e manipulação: a) mesa basculante e caminho de rolos; b) calha tombadora; c) dobradora; d) formador de laço; e) guia (GERDAU 2002).....	10
Figura 2.7	Representação esquemática dos tipos de tesouras: a) tesoura rotativa; b) tesoura rotativa tipo manivela; c) tesoura estática; d) tesoura snap (GERDAU 2002).....	11
Figura 2.8	Representação esquemática de bobinadeiras tipo Garret e tipo Edenborn (GERDAU 2002).....	12
Figura 2.9	Representação esquemática do fluxo do processo de laminação.	13
Figura 2.10	Fluxo de um laminador de rolos (GERDAU 2011).	15
Figura 2.11	Tipos de carepas no fio-máquina. (CETLIN 1999).....	15
Figura 2.12	Representação esquemática do processo de trefilação (GERDAU 2007).	16
Figura 2.13	Representação esquemática do fluxo do processo de trefilação.	17
Figura 2.14	Exemplos de processos mecânicos de decapagem: a) decapador mecânico por roletes de flexão; b) sistema de lixas rotativas; c) decapador mecânico com jateamento de granalha; d) decapador mecânico com palha de aço – prensa estática e rotativa (GERDAU 2007).....	18
Figura 2.15	Fluxo de uma trefilação de arames (GERDAU 2011).....	20

Figura 2.16	Transformação do grão durante o recozimento (GERDAU 2007).	21
Figura 2.17	Representação esquemática dos estágios da solidificação (CALLISTER 2007).	22
Figura 2.18	Representação esquemática do contorno de grão agindo como barreira para a movimentação das discordâncias (CALLISTER 2007).	23
Figura 2.19	Representação esquemática da distorção na rede cristalina em função da inserção de átomos intersticiais ou substitucionais (CALLISTER 2007).	24
Figura 2.20	Material com microestrutura a) antes da deformação e b) depois da deformação (GERDAU 2007).	24
Figura 2.21	Estrutura tetragonal da martensita.	25
Figura 3.1	Representação esquemática do laminador de rolos onde foram realizados os testes.	29
Figura 3.2	Máquina de ensaio de tração uniaxial EMIC 10.000.	32
Figura 4.1	Limite de resistência do FM 5,50mm SAE 1405 modificado.	34
Figura 4.2	Tamanho de grão do FM 5,50mm SAE 1405 modificado.	35
Figura 4.3	Micrografia da amostra 1, tamanho de grãos entre 134 μ m e 264 μ m.	35
Figura 4.4	Micrografia da amostra 2, tamanho de grãos heterogêneos entre 392 μ m e 1063 μ m.	36
Figura 4.5	Micrografia da amostra 3, tamanho de grãos entre 117 μ m e 283 μ m.	36
Figura 4.6	Camada de óxidos da amostra 1 (ampliação 1000x).	36
Figura 4.7	Camada de óxidos da amostra 2 (ampliação 1000x).	37
Figura 4.8	Camada de óxidos da amostra 3 (ampliação 1000x).	37
Figura 4.9	Medição da espessura do filme de óxidos do FM 5,50mm SAE 1405 mod.	37
Figura 4.10	Limite de resistência do FM 5,50mm SAE 1005 modificado.	38
Figura 4.11	Tamanho de grão do FM 5,50mm SAE 1005 modificado.	39
Figura 4.12	Micrografia da amostra 4, tamanho de grãos entre 178 μ m e 444 μ m.	40
Figura 4.13	Micrografia da amostra 5, tamanho de grãos entre 111 μ m e 278 μ m.	40
Figura 4.14	Micrografia da amostra 6, tamanho de grãos entre 89 μ m e 444 μ m.	41
Figura 4.15	Camada de óxidos da amostra 4 (ampliação 1000x).	41

Figura 4.16	Camada de óxidos da amostra 5 (ampliação 1000x).....	41
Figura 4.17	Camada de óxidos da amostra 6 (ampliação 1000x).....	41
Figura 4.18	Medição da espessura do filme de óxidos do FM 5,50mm SAE 1005 mod...42	
Figura 4.19	Comparativo entre o limite de resistência e a temperatura no formador de espiras para o FM 5,50mm SAE 1005 modificado.	42
Figura 4.20	Variação do limite de resistência do FM 5,50mm SAE 1005 modificado – Condição experimental 1.	44
Figura 4.21	Tamanho de grão do FM 5,50mm SAE 1005 modificado. – Condição experimental 1.	45
Figura 4.22	Micrografia da amostra 7, tamanho de grãos 36% entre 55,6 μ m e 111 μ m, 25% entre 611 μ m e 944 μ m e 39% maiores que 1500 μ m.	46
Figura 4.23	Micrografia da amostra 8, tamanho de grãos 29% entre 55,6 μ m e 133 μ m, 47% entre 525 μ m e 1092 μ m e 24% maiores que 1500 μ m.....	46
Figura 4.24	Micrografia da amostra 9, tamanho de grãos 38% entre 77,9 μ m e 126 μ m, 55% entre 175 μ m e 253 μ m e 7% maiores que 1500 μ m.	47
Figura 4.25	Camada de óxidos da amostra 7 (ampliação 1000x).....	47
Figura 4.26	Camada de óxidos da amostra 8 (ampliação 1000x).....	47
Figura 4.27	Camada de óxidos da amostra 9 (ampliação 1000x).....	47
Figura 4.28	Medição da espessura do filme de óxidos do FM 5,50mm SAE 1005 modificado – Condição experimental 1.....	48
Figura 4.29	Comparativo entre o limite de resistência e a temperatura no formador de espiras para o FM 5,50mm SAE 1005 mod. – Condição experimental 1.	49
Figura 4.30	Variação do limite de resistência do FM 5,50mm SAE 1005 modificado – Condição experimental 2.	50
Figura 4.31	Tamanho de grão do FM 5,50mm SAE 1005 modificado. – Condição experimental 2.	51
Figura 4.32	Micrografia da amostra 10, tamanho de grãos 17% entre 176 μ m e 425 μ m, 54% entre 508 μ m e 1007 μ m e 29% maiores que 1500 μ m.....	52
Figura 4.33	Micrografia da amostra 11, tamanho de grãos 42% entre 167 μ m e 500 μ m e 58% entre 584 μ m e 1084 μ m.....	52
Figura 4.34	Micrografia da amostra 12, tamanho de grãos 25% entre 93 μ m e 259 μ m, 30% entre 342 μ m e 591 μ m e 55% entre 857 μ m e 1090 μ m.	53

Figura 4.35	Camada de óxidos da amostra 10 (ampliação 1000x).....	53
Figura 4.36	Camada de óxidos da amostra 11 (ampliação 1000x).....	53
Figura 4.37	Camada de óxidos da amostra 12 (ampliação 1000x).....	53
Figura 4.38	Medição da espessura do filme de óxidos do FM 5,50mm SAE 1005 modificado – Condição experimental 2.....	54
Figura 4.39	Comparativo entre o limite de resistência e a temperatura no formador de espiras para o FM 5,50mm SAE 1005 mod. – Condição experimental 2.	55
Figura 4.40	Comparativo entre os limites de resistência do FM 5,50mm SAE 1405 mod., SAE 1005 mod. na condição padrão e nas condições experimentais 1 e 2. ...	56
Figura 4.41	Comparativo entre os tamanhos de grão médio e os limites de resistência médio das amostras.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Composição química dos aços (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 2000).....	28
Tabela 3.2	Plano de amostragem para caracterização dos materiais.....	30
Tabela 3.3	Plano de amostragem para caracterização do material nos testes.....	30
Tabela 3.4	Pontos de medição e coleta de amostras.....	31
Tabela 4.1	Composição química das amostras do FM 5,50mm SAE 1405 modificado (% em peso).....	33
Tabela 4.2	Médias e desvios do limite de resistência dos ensaios do FM 5,50mm SAE 1005 modificado.....	34
Tabela 4.3	Composição química das amostras do FM 5,50mm SAE 1005 modificado (% em peso).....	38
Tabela 4.4	Médias e desvios do limite de resistência dos ensaios do FM 5,50mm SAE 1005 modificado.....	39
Tabela 4.5	Composição química da amostra do FM 5,50mm SAE 1005 modificado – Condição experimental 1 (% em peso).....	43
Tabela 4.6	Médias e desvios do limite de resistência dos ensaios do FM 5,50mm SAE 1005 modificado – Condição experimental 1.	45
Tabela 4.7	Composição química da amostra do FM 5,50mm SAE 1005 modificado – Condição experimental 2 (% em peso).....	49
Tabela 4.8	Médias e desvios do limite de resistência dos ensaios do FM 5,50mm SAE 1005 modificado – Condição experimental 1.	50
Tabela 4.9	Médias e desvios dos limites de resistência dos materiais analisados.....	56
Tabela 4.10	Médias e desvios do tamanho dos grãos dos materiais analisados.	58
Tabela 4.11	Tabela comparativa dos percentuais de C, Mn, Si, quantidade % de perlita, tamanho de grão, e limites de resistência calculados e medidos.....	59
Tabela 4.12	Comparação das composições químicas das amostras (% em peso).....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
DOE	Design of Experiments;
Fe ₂ O ₃	hematita;
Fe ₃ O ₄	magnetita;
FeO	wustita;
FM	fio-máquina;
GLP	gás de petróleo liquefeito;
mod.	modificado;
NBR	denominação de norma da ABNT;
SAE	Society of Automotive Engineers.

RESUMO

O presente trabalho visa entender as relações entre as propriedades mecânicas e a composição química de fio-máquinas produzidos com aços SAE 1005 e SAE 1405 modificados e os parâmetros de controle de um laminador a fim de se obter, após a laminação a quente, as propriedades mecânicas semelhantes para os dois tipos de aço. A metodologia adotada envolveu as etapas de revisão da literatura e procedimento experimental D.O.E (Design of Experiments), com coleta de amostras de fio-máquina 5,50 mm produzido com o aço SAE 1005 modificado e outras de fio-máquina 5,50 mm produzido com o aço SAE 1405 modificado, nas condições normais de operação para avaliação das propriedades mecânicas através de ensaios de tração e análise metalográfica. Esse resultado visa criar uma alternativa para a fabricação de arames recozidos com o uso do fio-máquina produzido com o aço SAE 1005 modificado, com um menor custo do produto final.

Palavras-chaves: fio-máquina, propriedades mecânicas, laminação a quente.

ABSTRACT

The present work aims to understand the relationships between the mechanical properties and chemical composition of wire rod produced with SAE 1005 and SAE 1405 modified steels and the parameters of a rolling mill in order to obtain, after hot rolling, mechanical properties similar for both types of steel. The methodology involved the steps of literature review and experimental procedure DOE (Design of Experiments), with sampling of 5.50 mm wire rod produced with the SAE 1005 modified and other samples of 5.50 mm wire rod made from steel SAE 1405 modified under normal conditions of operation for evaluation of mechanical properties through tensile testing and metallographic analysis. This result created an alternative for the fabrication of annealed wire using the wire rod produced with the SAE 1005 modified, with a lower total cost of the final product.

Keywords: wire rod, mechanical properties, hot rolling mill.

1. INTRODUÇÃO

O atual cenário da siderurgia mundial caracterizado pela alta competitividade entre os principais produtores e também pelo aparecimento de novos entrantes nesse mercado, conjugado com a forte demanda pelos produtos siderúrgicos e a exigência pela qualidade, tornam o custo o fator preponderante para a sobrevivência na comercialização de commodities.

Na produção de produtos idênticos (commodities), de forma que, a única escolha dos consumidores é o preço, levando o mercado a ter um preço único, qualquer desvio do preço de mercado pode reduzir as vendas da empresa à zero (SCHERRER 2006). Assim, a batalha por produtos com preços mais competitivos passa obrigatoriamente pelo controle dos custos de produção.

Nesse cenário surge a necessidade das empresas desenvolverem alternativas de produção baseadas no uso de matérias-primas e processos alternativos. Em relação às materiais-primas às variações propostas para redução dos custos de produção através de variação na composição química ou uso de materiais alternativos, não devem afetar o desempenho do produto final.

O grande desafio vigente busca atender a qualidade exigida do produto conforme sua aplicação e ao mesmo tempo aperfeiçoar o ciclo de produção garantindo um aumento na produção e conseqüente redução de custos associados a este processo (KALIL 2009).

1.1. Objetivo

O presente trabalho visa criar uma alternativa de matéria-prima para a produção de arames recozidos com baixo custo do emprego. Para tal busca-se caracterizar o FM 5,50 mm SAE 1405 modificado através da determinação das suas propriedades mecânicas e

encontrar as parâmetros adequados para atingir as mesmas propriedades mecânicas no FM 5,50mm SAE 1005 modificado, uma vez que o custo na utilização do aço SAE 1405 modificado é aproximadamente 48% maior do que na utilização do aço SAE 1005 modificado.

1.2. Justificativa

Os arames recozidos podem apresentar limite de resistência à tração de até 550 MPa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 1982). Mesmo assim, práticas de mercado indicam a referência de 400 MPa (GERDAU 2011). Atualmente o uso do FM 5,50mm SAE 1405 modificado proporciona a fabricação dos arames garantindo à adequação a essas práticas. Na tentativa de obter os parâmetros desejados no SAE 1005 modificado a variação dos parâmetros de resfriamento provoca alterações na microestrutura do material, tais como modificações do tamanho do grão, assim como alterações da camada dos óxidos formados.

A resistência mecânica dos materiais pode ser alterada através de técnicas de endurecimento. As técnicas de endurecimento em metais contam com um princípio simples: quanto maior for a restrição ao movimento de discordâncias, maior será a resistência mecânica de um material metálico (CALLISTER 2007). Essas restrições podem ser das seguintes formas: endurecimento por refino de grão, endurecimento pela formação de solução sólida, endurecimento por encruamento, endurecimento por dispersão de partículas e endurecimento por transformação de fase.

1.3. Delimitações do Trabalho

No presente trabalho serão estudadas as variações do tamanho de grão em função das condições de resfriamento do material para obtenção do limite de resistência necessário para fabricação dos arames recozidos na utilização do aço SAE 1005 modificado para fabricação do FM 5,50mm. Além disso, serão avaliadas as consequências de tais alterações na microestrutura do material e na formação dos óxidos de ferro.

O trabalho limita-se a realização de testes no processo de laminação sem entrar nos parâmetros e processo de trefilação.

Para isso serão revisados os conceitos sobre laminação, arames recozidos e mecanismos de endurecimento de metais (técnicas de endurecimento), e apresentados os resultados dos testes realizados com os aços SAE 1405 e 1005.

2. REVISÃO

2.1. Processo de Laminação

O processo de deformação plástica de metais através de sua passagem por entre rolos é conhecido como laminação (DIETER 1988). Este é o processo metalúrgico mais utilizado para conformação de metais, pois proporciona alta produção e maior proximidade do produto final. Nesse processo, o material é submetido a altas tensões de compressão sendo espremido por entre os rolos. O processo de laminação pode ser classificado, dependendo da temperatura de trabalho, como laminação a quente ou a frio. Em ambos os casos, o objetivo principal é a redução da seção transversal do material, conferindo-lhe a forma e as propriedades mecânicas desejadas.

Laminação é um processo de conformação mecânica executado por compressão direta, sem retirada de material, visando obter deformações plásticas no material conformado (CODA 2007). Isto significa alterações permanentes na forma e propriedades de um corpo sólido, mantida a sua massa. Esta deformação, genericamente, consiste em redução da altura, aumento de comprimento e aumento da largura (volume constante), conforme Figura 2.1.

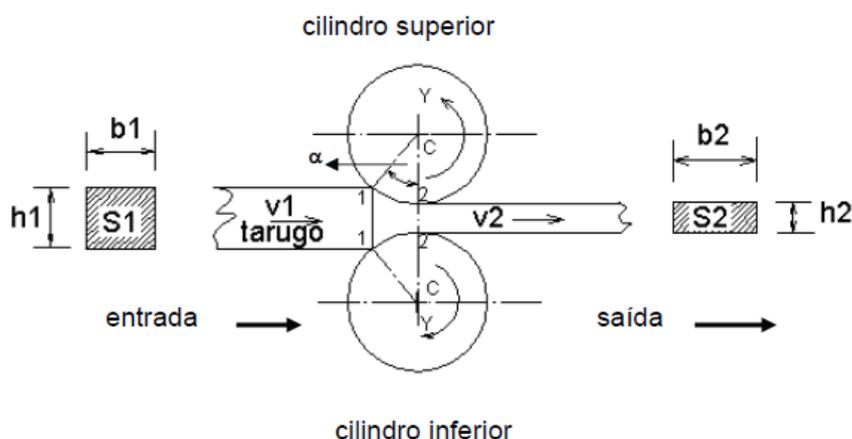


Figura 2.1 Representação esquemática do conceito de laminação (GERDAU 2002).

O processo de laminação parte de uma matéria-prima que apresenta estrutura e propriedades inadequadas para o uso final. Através do trabalho de deformação a quente ou a frio, reduz as dimensões e dá forma ao material. Os produtos de laminação apresentarão estruturas metalúrgicas e propriedades adequadas para o uso final, além de formas e acabamentos mais adequados.

O processo de laminação convencional é realizado a partir da transformação da estrutura bruta de fusão do tarugo onde grãos austeníticos grosseiros são refinados pela repetição da deformação e recristalização transformam-se em uma estrutura ferrítica relativamente grossa (TEOH 1995). Esses grãos ferríticos nucleiam exclusivamente no contorno de grão da austenita. Esse processo foi originalmente desenvolvido para alta produtividade sem muita preocupação com o resultado das propriedades mecânicas.

Posteriormente desenvolvido, o processo de laminação controlada veio acrescentar um maior controle sobre as propriedades mecânicas desejadas, sendo necessário o desenvolvimento de equipamentos e processos mais automatizados, como por exemplo o controle do resfriamento do fio-máquina pelo equipamento conhecido como Stelmor, que através da abertura e fechamento de palhetas e a habilitação ou não de ventiladores, promovem o resfriamento controlado para obtenção de melhores propriedades mecânicas em vergalhões (KAZEMINEZHAD 2003).

2.2. Principais Equipamentos de Laminação

Para executar o processo de laminação, as usinas siderúrgicas possuem instalações próprias denominadas laminadores, onde os equipamentos de laminação são montados.

Todos os laminadores possuem os seguintes equipamentos: forno de reaquecimento de tarugos, gaiolas de laminação, acionamento das gaiolas, dispositivos de transferência e manipulação do material durante o processo, tesouras para corte do material durante o processo, leito de resfriamento e/ou formador de rolos dos produtos acabados e dispositivos de enfeixamento e empacotamento.

2.2.1. Fornos de Reaquecimento

O principal objetivo dos fornos de reaquecimento é reaquecer os tarugos, placas ou blocos, controladamente, até a faixa de temperatura adequada para o processo de laminação, normalmente acima da temperatura de austenitização do material.

Para prover a energia de reaquecimento são queimadas misturas de ar e óleos combustíveis pesados e/ou gases combustíveis (gás natural, GLP, gases de alto-forno) no interior dos fornos.

Os fornos de reaquecimento podem ser de quatro tipos:

Fornos Estacionários ou de Carga

São fornos tipo poço ou tipo câmara, geralmente utilizados para aquecer grandes lingotes, que são carregados como lotes e permanecem em processo de aquecimento por longos tempos.

Fornos Rotativos

São fornos utilizados para reaquecimento de tarugos para a laminação de tubos sem costura ou para reaquecimento de lingotes médios, conforme ilustra a Figura 2.2.

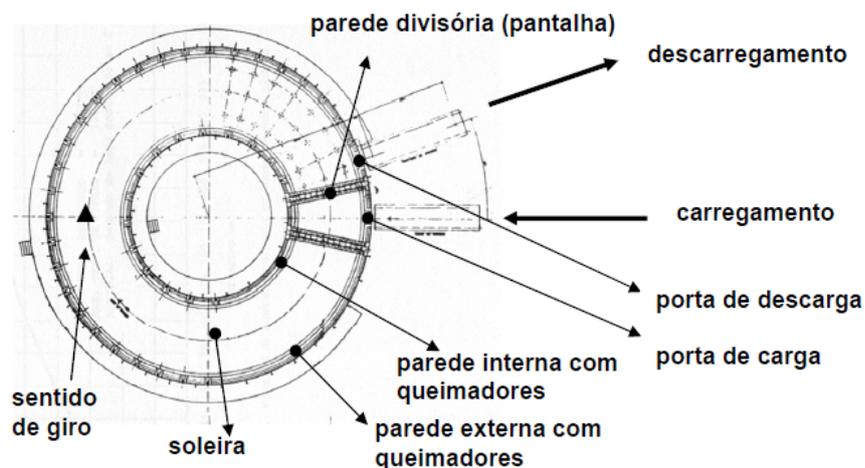


Figura 2.2 Representação esquemática em planta de um Forno Rotativo (GERDAU 2001).

Fornos a Indução

São fornos utilizados para o aquecimento de tarugos, por meio de energia elétrica, fazendo com os tarugos passem pelo interior de uma bateria de bobinas, nas quais circula uma corrente elétrica de alta frequência. É utilizado, principalmente, para aquecer tarugos pré-aquecidos ou saídos diretamente do lingotamento contínuo.

Fornos Contínuos

Para laminadores de produtos longos, ou seja, para produção de barras, perfis e fio-máquina, são utilizados grandes fornos de reaquecimento contínuos. São chamados de contínuos porque tanto o carregamento quanto o descarregamento dos tarugos são executados continuamente, a intervalos regulares.

Esse deslocamento pode ser feito de duas formas básicas, definem o tipo do forno contínuo:

Forno Contínuo tipo Empurrador (Pusher)

Nesses fornos, os tarugos são colocados na extremidade de carregamento e avançam, ao longo do eixo do forno, por meio de um sistema empurrador. Com essa condição, todos os tarugos ficam encostados uns nos outros, não havendo espaço entre eles, o que faz com que cada um deles seja empurrado pelo outro em direção a extremidade de desenformamento, conforme a Figura 2.3.

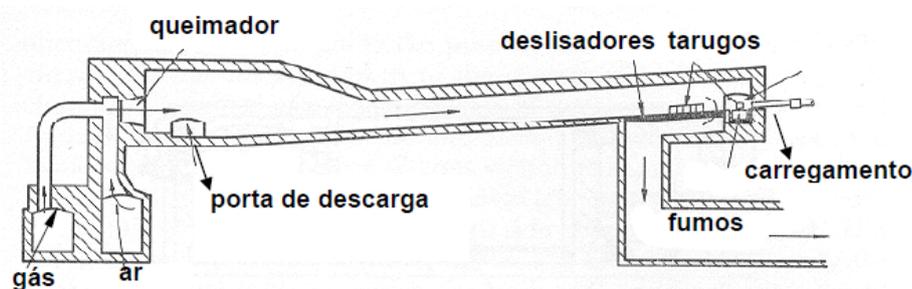


Figura 2.3 Representação esquemática de um Forno Contínuo tipo Empurrador (GERDAU 2001).

Forno Contínuo tipo Vigas Móveis (Walking Bean) ou Soleiras Móveis (Walking Hearth)

Nesses fornos, parte da soleira é móvel e parte é fixa, o que faz com os tarugos que são colocados em uma extremidade sejam conduzidos até a extremidade de desenformamento pelo movimento cíclico de subida, avanço, descida e retorno da soleira ou vigas. Com essa condição de movimentação da carga, os tarugos podem ficar afastados uns dos outros, de uma distância fixa.

2.2.2. Gaiolas de Laminação

São os equipamentos destinados a conter os cilindros de laminação e a mantê-los nas suas respectivas posições, absorvendo os esforços que se desenvolvem durante o processo de laminação.

Os principais componentes de uma gaiola de laminação são os seguintes:

- Cilindros de laminação;
- Mancais de apoio dos cilindros;
- Suporte dos mancais;
- Barrões de fixação das guias, com dispositivos ajustadores de altura;
- Guias de laminação;
- Eixos de acionamento;
- Dispositivos de fixação das gaiolas nas bases;
- Dispositivos de regulagem da distância entre cilindros (luz).

Os principais tipos de gaiolas de laminação são: tipo convencional, tipo housingless e tipo cantilever, conforme Figura 2.4.

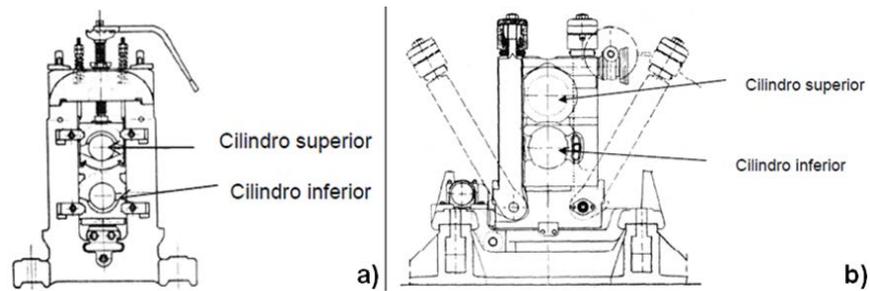


Figura 2.4 Representação esquemática de gaiolas de laminação: a) tipo Convencional; b) tipo Housingless (GERDAU 2002).

De acordo com o número de cilindros montados na gaiola, esta pode ser classificada em: duo (2 cilindros), trio (3 cilindros) ou quádruo (4 cilindros).

De acordo com a posição dos eixos dos cilindros, as gaiolas podem ser: horizontais, verticais ou universais.

2.2.3. Acionamento das Gaiolas

O acionamento das gaiolas é feito através de um conjunto de: motor elétrico, acoplamentos, redutor de velocidades, caixa de pinhões e eixos de acionamento acoplados aos pinhões e aos cilindros, conforme ilustrado pela Figura 2.5.

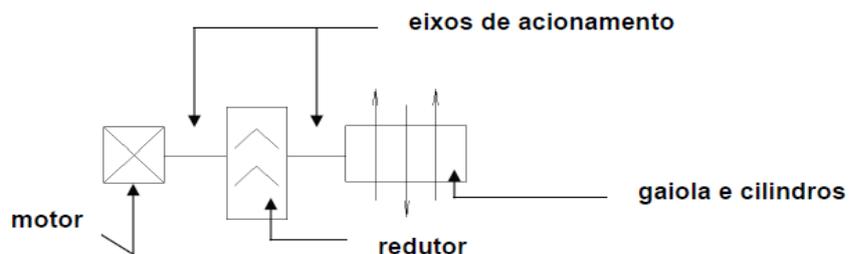


Figura 2.5 Representação esquemática de um acionamento para gaiolas de laminação (GERDAU 2002).

2.2.4. Dispositivos de Transferência e Manipulação do Material

São necessários certos dispositivos para garantir que o material seja conduzido através do processo, dependendo das características dos equipamentos e do arranjo do laminador. Entre eles estão os seguintes (Figura 2.6):

- Caminhos de rolos motorizados;
- Mesa basculante (desbastes abertos);
- Calhas tombadoras (desbastes abertos);
- Dobradoras;
- Formadores de laço;
- Transferidores de correntes;
- Calhas;
- Guias de laminação, tanto para a entrada como para a saída dos canais nos cilindros;

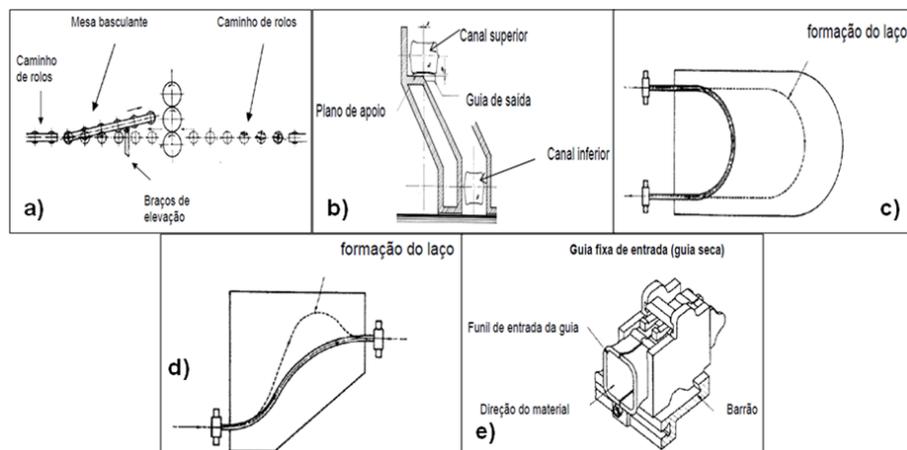


Figura 2.6 Representação esquemática dos dispositivos de transferência e manipulação: a) mesa basculante e caminho de rolos; b) calha tombadora; c) dobradora; d) formador de laço; e) guia (GERDAU 2002).

2.2.5. Tesouras para Corte do Material

As tesouras têm papel fundamental no processo de laminação, servindo para realizar os despontes das pontas frias das barras, atuando como emergência, divisão das barras acabadas, amostras de material e, também, para o corte final dos produtos acabados. Entre os principais modelos de tesouras destacam-se as que estão ilustradas na Figura 2.7:

- Tesouras rotativas (corte a quente da barra em movimento);
- Tesouras rotativas tipo manivela (start-stop);
- Tesouras snap (corte de amostras e atuando como emergência);
- Tesouras estáticas (corte a frio dos produtos acabados).

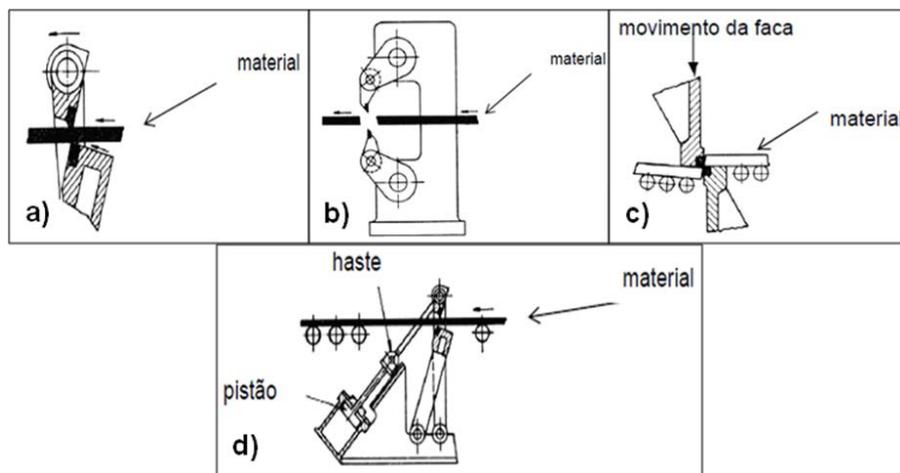


Figura 2.7 Representação esquemática dos tipos de tesouras: a) tesoura rotativa; b) tesoura rotativa tipo manivela; c) tesoura estática; d) tesoura snap (GERDAU 2002).

2.2.6. Leito de Resfriamento

Em laminadores de barras e perfis, o leito de resfriamento é o local onde o produto acabado é enviado após o último passe de laminação, após ter sido cortado no comprimento mais próximo possível do comprimento comercial desejado.

A partir do leito, o material é enfeixado, pesado, amarrado e enviado ou para o estoque ou direto para os clientes. Após essa operação ainda podem existir etapas de endireitamento para perfis ou dobramento para vergalhões.

2.2.7. Formador de Rolos

Em laminadores de rolos utilizam-se dispositivos especiais denominados bobinadeiras ou formadores de espiras. Entre eles destacam-se

- **Bobinadeiras tipo Garret** (para materiais com maiores seções de redondos e com velocidade limitada), conforme Figura 2.8;
- **Bobinadeiras tipo Edenborn** (para materiais com menores seções de redondos e com velocidade maior), conforme Figura 2.8;
- **Bobinadeiras tipo Combinado** (combinação dos tipos anteriores);
- Formadores de Espiras (para altas velocidades de laminação dos blocos acabadores de fio-máquina), conjugados a sistemas de resfriamento do fio (água-ar), sistema impulsionador de caudas, o próprio formador de espiras, transportador de espiras por correntes e/ou rolos e coletor de espiras ou bobinas.

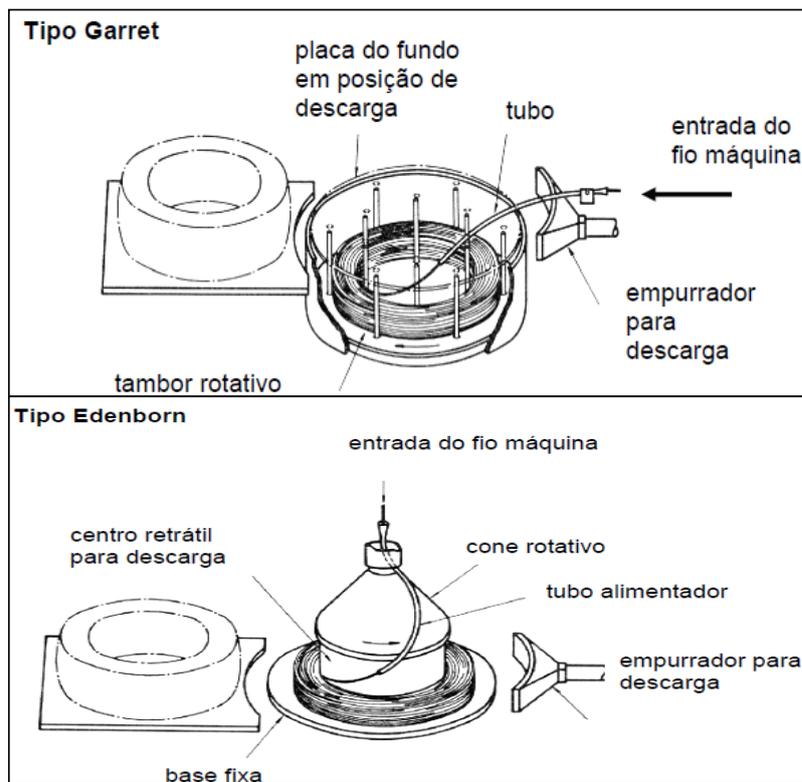


Figura 2.8 Representação esquemática de bobinadeiras tipo Garret e tipo Edenborn (GERDAU 2002).

2.3. Matérias-Primas e Produtos

Tanto as matérias-primas quanto os produtos finais dos laminadores dependem do tipo de laminador. As matérias-primas podem ser tarugos, placas ou blocos, e os produtos podem ser chapas grossas, tiras a quente, vergalhões, barras, tubos, trilhos, perfis estruturais ou fio-máquina.

Placas: produtos de seção retangular (largura de 600 até 2500mm e altura 60 até 300mm aproximadamente).

Blocos: produtos de seção redonda, poligonal, quadrada, senão a maior parte em seção quadrada (normalmente com lados de 160 a 300mm).

Tarugos: produtos de seção redonda, poligonal, quadrada, sendo a maior parte em seção quadrada (normalmente com lados de 80 a 160mm).

2.4. Fluxo do processo de laminação

A figura 2.9 apresenta o fluxograma de um processo convencional de laminação. Em algumas plantas com processo mais modernos a etapa de reaquecimento tem sido eliminada.



Figura 2.9 Representação esquemática do fluxo do processo de laminação.

No processo de laminação a chegada e armazenamento da matéria-prima é o início de todo processo. Os tarugos, placas ou blocos, que vem do processo de Aciaria são recebidos e armazenados no PTL (Pátio de Tarugos de Laminação). Nesse local ficam armazenados os materiais, classificados por tipo de aço e separados por lotes de produção.

Em seguida a matéria-prima é conduzida, normalmente por caminho de rolos, até o forno de reaquecimento, onde o material será reaquecido até uma temperatura de 1000 a 1200°C, para permitir o processo de laminação à quente.

Uma vez aquecido o material, este estará pronto para ser conformado mecanicamente. Nesse processo de conformação destacam-se três fases distintas no processo de laminação:

Desbaste: parte inicial do processo onde ocorrem os passes iniciais de laminação partindo do tarugo aquecido. As gaiolas de desbaste proporcionam as primeiras deformações no tarugo, preparando-o para iniciar os passos nos cilindros intermediários realizando o refinamento da estrutura bruta de fusão.

Intermediário: parte do processo onde são executados os passes para preparar progressivamente a forma e as dimensões do perfil desejado. As gaiolas do intermediário consistem nos passes que visam preparar o tarugo laminado para a etapa final.

Acabador: parte do processo onde ocorrem os passes finais da seqüência e que dão ao material a forma e dimensões desejadas. As gaiolas do acabador têm a função de atingir a forma do produto final e sua respectiva tolerância dimensional. O produto final pode ser Rolos ou Barras.

Ao finalizar as etapas de conformação mecânica o material deve passar por uma etapa de resfriamento para que retorne a temperatura ambiente e atinja as propriedades mecânicas desejadas.

Por fim, o material passa por etapas de acabamento, que consistem em embalagem, identificação ou reprocessamento.

A Figura 2.10 ilustra o fluxo de um laminador de rolos, iniciando pela matéria-prima, reaquecimento, passes de laminação, resfriamento, formação das espiras, resfriamento final e formação das bobinas.

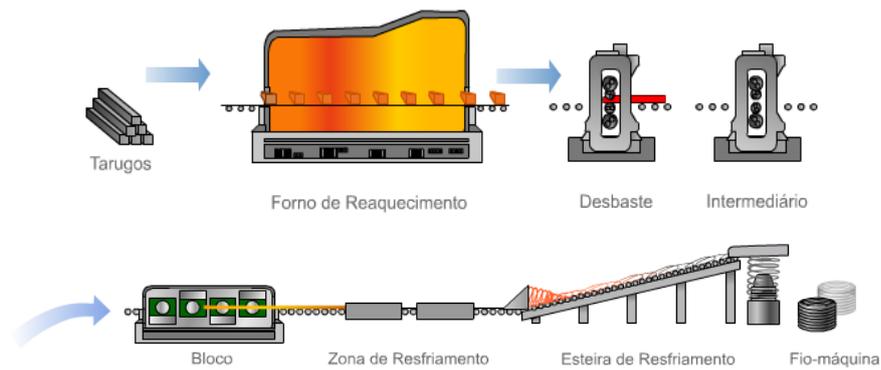


Figura 2.10 Fluxo de um laminador de rolos (GERDAU 2011).

2.5. Carepa

Carepa é a nomenclatura dada aos óxidos formados pela oxidação do ferro na superfície dos aços em altas temperaturas. Quando os aços são submetidos a atmosferas oxidantes em fornos de reaquecimento nas laminações ocorre a formação de uma camada de óxidos sobre a superfície metálica. A carepa formada em altas temperaturas é constituída de três camadas distintas, conforme ilustra a Figura 2.11, que do exterior em direção a superfície do aço se denominam, hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) e wustita (FeO) (CHEN 2000).

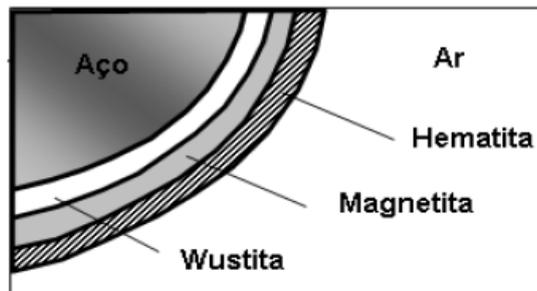


Figura 2.11 Tipos de carepas no fio-máquina. (CETLIN 1999)

A formação da carepa é influenciada pela composição química do aço, atmosfera do forno de reaquecimento, tempo e temperatura de reaquecimento, tempo e temperatura de laminação e condição superficial do material antes do reaquecimento. Cada um dos diferentes óxidos formados apresenta diferente morfologia e propriedades mecânicas (SUN 2004).

Durante a laminação a quente, três tipos de carepa podem ser formados (PAUWLITZKI apud DA SILVA 2010):

Primária: formada durante o processo de reaquecimento;

Secundária: formada durante o processo de laminação;

Terciária: formada entre os passes finais de laminação e o leito de resfriamento.

Entre os três tipos de óxidos de ferro possíveis de serem formados no processo de laminação, cabe o cuidado com a formação da hematita (Fe_2O_3), pois ela é responsável por maior aderência dos óxidos ao material. Esse tipo de oxidação gera maiores problemas no processo de decapagem mecânica para os processos de trefilação (CHATTOPADHYAY 2009).

2.6. Processo de Trefilação

A trefilação se caracteriza por um processo de conformação mecânica que ocorre com o tracionamento de um fio, barra ou tubo através de uma matriz cônica (fieiras), ocasionando uma redução de área e um alongamento de comprimento. Trata-se de um processo mecânico que confere ao material precisão dimensional e melhores propriedades mecânicas (DIETER 1988).

O princípio do processo de trefilação é proporcionar uma redução na área do material através de sucessivos passes (CETLIN 1999). De maneira análoga ao processo de laminação, a mesma quantidade de material que entra em uma fieira deve ser a mesma que sai. Para isso é aplicado um esforço na ponta da barra que sai da matriz conforme a Figura 2.12.

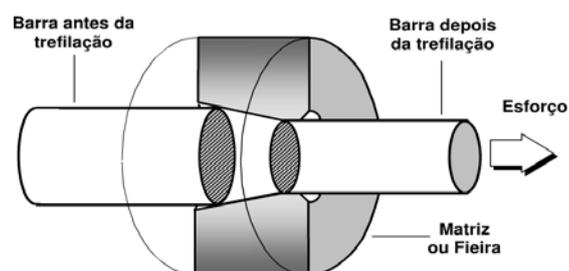


Figura 2.12 Representação esquemática do processo de trefilação (GERDAU 2007).

O processo de trefilação pode ser representado pelo fluxograma da Figura 2.13:

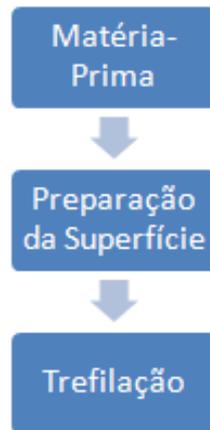


Figura 2.13 Representação esquemática do fluxo do processo de trefilação.

2.6.1. Matéria-Prima

Na fabricação de arames de aço a matéria-prima empregada é o fio-máquina. A bitola do fio-máquina pode variar de acordo com a especificação do produto final desejado e do tipo de tecnologia presente na indústria, sendo o 5,5mm a bitola mais comum.

Os rolos de fio-máquina, muitas vezes, são enviados para centrais de solda nas trefilarias, onde a ponta de um rolo é soldada na ponta de outro rolo, permitindo operar os equipamentos por períodos de tempos maiores, sem interrupções para reabastecimento.

Entre as características consideradas fundamentais para um bom fio-máquina estão:

- mínima ovalização;
- boas propriedades mecânicas (como limite de ruptura do material);
- isento de defeitos superficiais (lascas, arranhões acentuados);
- oxidação superficial.

2.6.2. Preparação da Superfície

O processo de trefilação inicia pelo desbobinamento dos rolos de fio-máquina, através de desbobinadores que podem ser verticais ou horizontais para que o material seja “esticado” e passe pelos demais equipamentos na sequência do processo.

A seguir, as bobinas de fio-máquina para trefilação são previamente decapadas, isto é, é retirada a camada de óxido da superfície (carepa de laminação). Caso isto não seja realizado, problemas de desgaste de fieiras e problemas superficiais no material trefilado irão aparecer. A remoção dessa carepa pode ocorrer de várias formas. Entre eles podemos citar:

- **Decapagem Mecânica** (dobramento por flexão, jateamento por granalha, lixas rotativas, escovas rotativas, etc.). Neste caso o material é submetido a esforços mecânicos que “quebram” a carepa e posteriormente limpam a superfície do material, conforme Figura 2.14
- **Decapagem Química** (utilização de soluções ácidas, normalmente Ácido Sulfúrico (H_2SO_4)). Neste caso o material é mergulhado num tanque com um banho de ácido e permanece durante um tempo para que ocorra a reação.

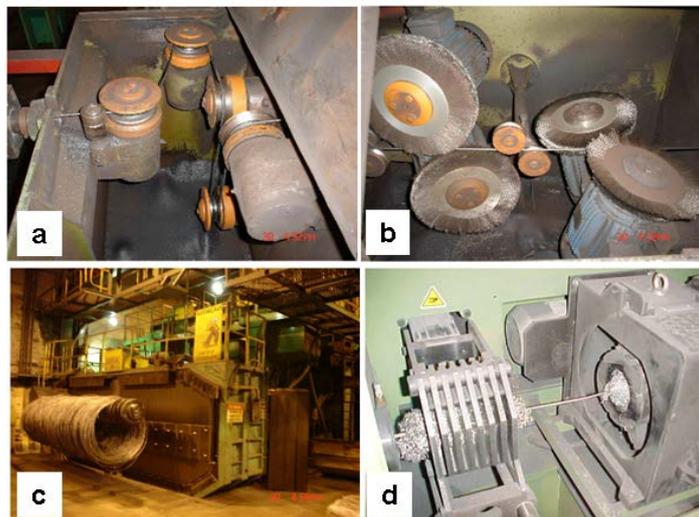


Figura 2.14 Exemplos de processos mecânicos de decapagem: a) decapador mecânico por roletes de flexão; b) sistema de lixas rotativas; c) decapador mecânico com jateamento de granalha; d) decapador mecânico com palha de aço – prensa estática e rotativa (GERDAU 2007).

Inicialmente o processo de decapagem utilizado era através do uso de Ácido Clorídrico (HCL), porém, atualmente, devido às restrições impostas pela legislação ambiental o uso desses processos químicos de decapagem está sendo deixado de lado (BHATTACHARYA 2006). Por esse motivo o desenvolvimento de matérias-primas com carepas de fácil remoção torna essencial.

2.6.3. Trefilação

A Trefilação é a transformação mecânica feita a frio no sentido de reduzir o diâmetro do produto de acordo com a especificação do cliente. O produto é acumulado na forma de bobinas, produto endireitado ou barras e será então matéria-prima na produção de produtos comerciais.

Em cada passe é utilizado lubrificante e uma matriz conhecida como fieira, que é usualmente constituída de uma carcaça metálica com núcleo de metal duro. Este núcleo, de dimensão controlada, é quem dará a forma do produto naquele passe.

Características principais das máquinas de trefilar:

- máquinas monoblocos e múltiplos passes;
- tracionamento dos arames realizados pelos blocos maiores;
- velocidades típicas de 4 a 40m/s;
- processo integrado (desbobinamento + decapagem + trefilação + bobinamento);
- utilização de fieiras ou cassetes de laminação a frio no processo produtivo.

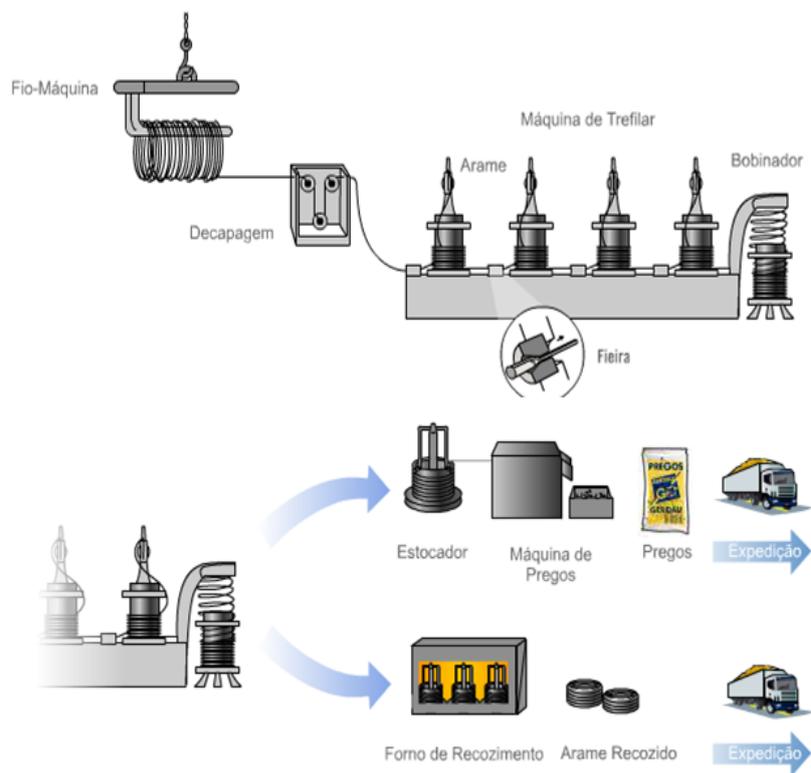


Figura 2.15 Fluxo de uma trefilação de arames (GERDAU 2011).

2.7. Arames Recozidos

São arames largamente utilizados na construção civil, principalmente para fixar armaduras de concreto armado em obras de qualquer porte, e também na amarração de peças industriais.

Os arames recozidos são produzidos com aço baixo teor de carbono, o que atribui a eles alta maleabilidade e facilidade de utilização em aplicações que exigem dobras e/ou torções. São disponibilizados no mercado em bitolas que variam de 1,25 a 6,04mm em embalagens de vários pesos diferentes.

2.7.1. Recozimento

Recozimento é o aquecimento e encharque do material até uma faixa de temperaturas de 480 a 700°C, seguido do seu resfriamento até a temperatura ambiente.

Entre os principais objetivos do recozimento destacam-se:

- reduzir os limites de escoamento e de resistência do material até valores semelhantes aos que o material tinha antes de ser trefilado;
- aumentar o alongamento percentual do material até valores semelhantes aos que o material tinha antes de ser trefilado;
- arredondar novamente os grãos alongados do material.

O recozimento não acontece de uma só vez. No início do aquecimento, não acontece nada com os grãos. É o que chamamos de tempo de incubação. Depois, aparecem núcleos de material mais macio. Em seguida, os núcleos vão crescendo e substituindo os grãos alongados e mais duros. Esta parte do recozimento chama-se recristalização.

A Figura 2.16 mostra o que acontece com os grãos do material encruado durante a incubação e a recristalização.

É importante notar que o tempo total de recristalização é a soma dos tempos de incubação e de recristalização.

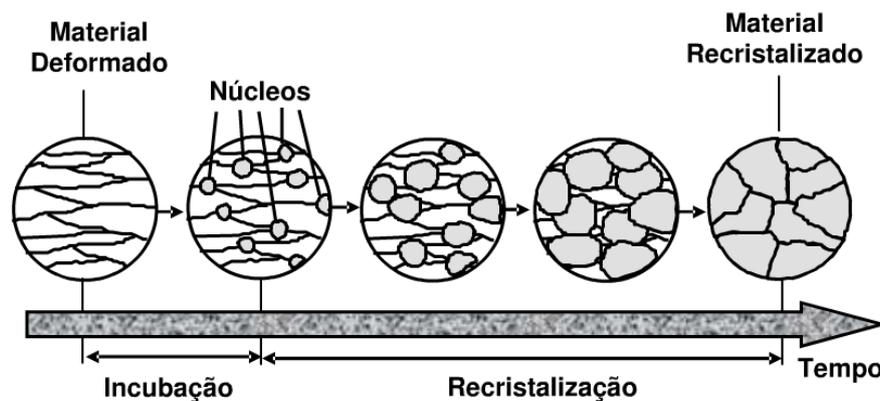


Figura 2.16 Transformação do grão durante o recozimento (GERDAU 2007).

2.8. Mecanismos de Endurecimento em Metais

Na evolução do processo industrial, os engenheiros buscaram desenvolver materiais com elevada resistência mecânica para enfrentar as diversas condições de uso, sem perder

de vista as demais propriedades que acabam sendo afetadas quando os materiais sofrem o endurecimento, tais como a ductilidade e a tenacidade.

Como as deformações plásticas correspondem ao movimento de um grande número de discordâncias, a habilidade de um metal deformar plasticamente depende, basicamente, da movimentação de suas discordâncias.

A melhoria nas propriedades mecânicas dos aços está associada com diferentes mecanismos de endurecimento (EL-BITAR et al. 2012). Para isso vários estudos e processos metalúrgicos já foram desenvolvidos utilizando o melhor de cada um desses mecanismos.

Os mecanismos endurecimento em metais se baseiam em um princípio simples: quanto maior for a restrição ao movimento de discordâncias, maior será a resistência mecânica de um material metálico (CALLISTER 2007).

Na sequencia são descritos os cinco mecanismos de endurecimento para aumento da resistência mecânica e escoamento dos metais (DIETER 1988):

2.8.1. Endurecimento por Refino de Grão

A maioria dos materiais metálicos é obtida a partir do metal líquido e posteriormente sofre conformação mecânica. Na solidificação o encontro das diferentes orientações cristalográficas caracteriza o contorno de grão.

A Figura 2.17 mostra uma representação esquemática dos estágios da solidificação de um material policristalino.

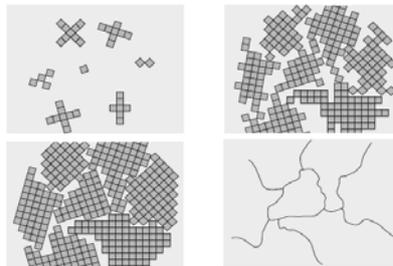


Figura 2.17 Representação esquemática dos estágios da solidificação (CALLISTER 2007).

O contorno de grão cria uma dificuldade para a discordância se movimentar. Quanto menor o tamanho do grão, mais contornos (Figura 2.18).

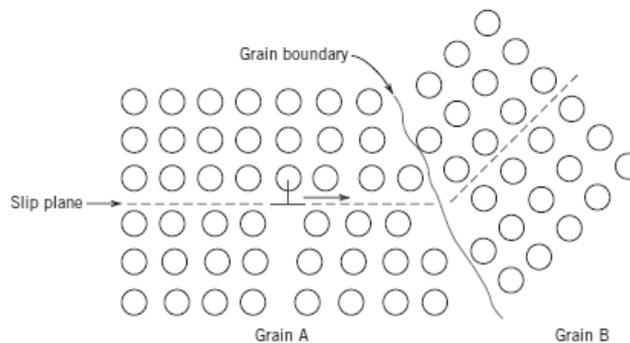


Figura 2.18 Representação esquemática do contorno de grão agindo como barreira para a movimentação das discordâncias (CALLISTER 2007).

Um material de granulação fina é mais duro e resistente porque tem uma maior área de contorno de grão, de forma que dificulta com mais eficiência o movimento de discordâncias.

Atualmente, com a exploração cada vez maior do processo de laminação controlada, o mecanismo de endurecimento por refino de grão tem sido destacado em diversos estudos, principalmente pelo fato de esse mecanismo promover simultaneamente aumento da resistência mecânica e dureza (LEE 2010).

2.8.2. Endurecimento pela Formação de Solução Sólida

Quando misturas homogêneas de duas ou mais espécies atômicas ocorrem no estado sólido, elas são chamadas de soluções sólidas.

Quando as propriedades mecânicas de um sólido são modificadas pela introdução de átomos de soluto, o endurecimento resultante é chamado de endurecimento por solução sólida (Figura 2.19).

Os campos de tensão gerados por átomos de soluto interagem com os campos de tensão das discordâncias, dificultando a movimentação das discordâncias e, conseqüentemente, promovendo o endurecimento.

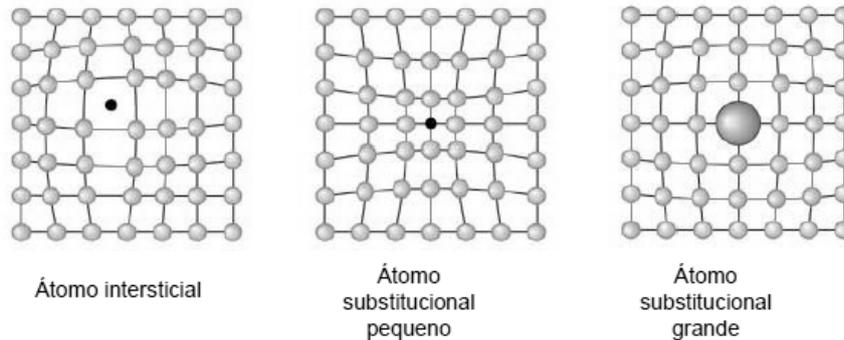


Figura 2.19 Representação esquemática da distorção na rede cristalina em função da inserção de átomos intersticiais ou substitucionais (CALLISTER 2007).

2.8.3. Endurecimento por Encruamento

Materiais encruados são aqueles que são “trabalhados a frio”, ou seja, conformados mecanicamente (ou deformados plasticamente) em uma temperatura inferior à temperatura de recristalização, como por exemplo, em processos de trefilação.

Esse endurecimento ocorre devido ao aumento de discordâncias e imperfeições promovidas pela deformação, que impedem o escorregamento dos planos atômicos. A medida que se aumenta o encruamento maior é a força necessária para produzir uma maior deformação.

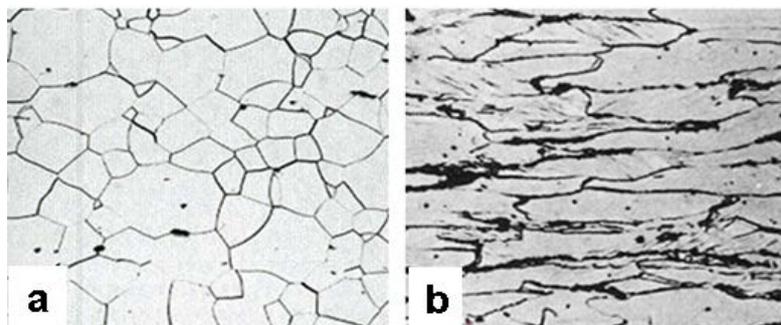


Figura 2.20 Material com microestrutura a) antes da deformação e b) depois da deformação (GERDAU 2007).

2.8.4. Endurecimento por Partículas de Segunda Fase

O endurecimento por partículas de segunda fase pode ser classificado como sendo de dois tipos: dispersão ou precipitação. No endurecimento por dispersão as partículas usualmente são visíveis ao microscópio óptico e já se fazem presente durante o processo de solidificação/resfriamento do material. Enquanto que o endurecimento por precipitação ou por envelhecimento, como também é chamado, é produzido por um tratamento térmico de solução onde partículas pequenas de segunda fase entram em solução sólida em temperaturas elevadas, mas precipitam depois sofrerem têmpera e envelhecimento a baixas temperaturas. Para que ocorra a precipitação, tais partículas devem ser solúveis em temperaturas elevadas, mas devem reduzir a sua solubilidade à medida que a temperatura decresce.

Os precipitados dificultam a movimentação das discordâncias, aumentando a resistência do material.

2.8.5. Endurecimento por Transformação de Fase (Martensita)

Este mecanismo de endurecimento é um dos mais utilizados na indústria. Ocorre devido ao deslocamento dos átomos de ferro devido à presença dos átomos de carbono na estrutura tetragonal (TCC) da martensita. Esta distorção do reticulado é que provoca o endurecimento devido à dificuldade de movimentação das discordâncias.

Além disso, a subestrutura da martensita incorpora uma grande densidade de discordâncias e maclas, que dificultam ainda mais o movimento de discordâncias.

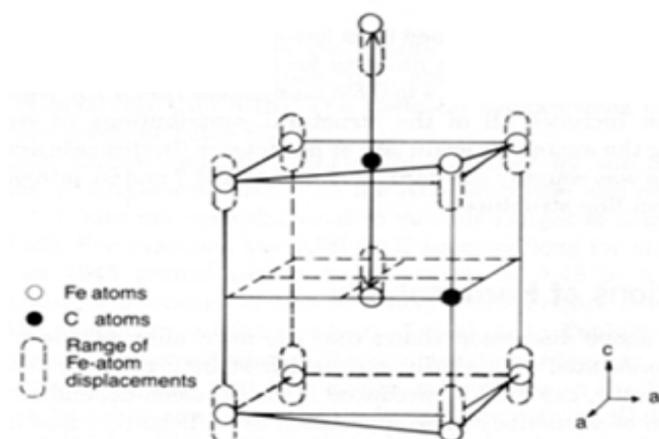


Figura 2.21 Estrutura tetragonal da martensita.

2.9. Taxas de Resfriamento

Entre os diversos estudos já realizados foi verificado que as propriedades finais dos produtos laminados são influenciadas pelos seguintes parâmetros (KAZEMINEZHAD 2003):

- a temperatura de reaquecimento dos tarugos;
- a taxa de deformação;
- a temperatura de deformação;
- a temperatura final do processo;
- a taxa de resfriamento após laminado.

O último parâmetro listado, taxa de resfriamento, tem efeito no controle do tamanho de grão como foi citado por diversos autores, como Ghosh et al. (2006), Zaky et al. (2009), Korczak (2004) em seus trabalhos e é o fator que será trabalhado nesse estudo através da temperatura de formação das espiras.

Em condições de resfriamento controlado, à medida que a taxa de resfriamento do aço aumenta a taxa de nucleação de novos grãos aumenta, porém a mobilidade dos átomos diminui.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Metodologia

O trabalho foi realizado utilizando o procedimento experimental D.O.E (Design of Experiments).

É recomendado que a experimentação envolva pessoas que dominem o assunto relacionado ao problema e que durante os experimentos, o processo seja cuidadosamente monitorado, para garantir que tudo seja realizado de acordo com os planos, pois erros no procedimento experimental muito provavelmente invalidarão os resultados (WERKEMA 1996).

Dessa forma, baseado nos conceitos básicos de laminação organizou-se um experimento completamente aleatorizado com um único fator, onde se supõe que para o processo analisado o objetivo seja estudar o efeito de um único fator de interesse sobre um item de controle deste processo. O fator em análise é a temperatura de formação das espiras e o item de controle, o limite de resistência em MPa.

Para isso a primeira etapa do experimento consiste da caracterização das composições químicas e das propriedades mecânicas do FM 5,50mm produzido com o aço SAE 1405 modificado e do FM 5,50mm produzido com o aço SAE 1005 modificado, relacionando, ao final, as suas propriedades em função do limite de resistência estabelecido para os arames recozidos, tanto pela norma, quanto pelo que é praticado no mercado.

Além disso, foi realizada a verificação da relação entre as propriedades mecânicas do fio-máquina 5,50 mm produzido com o aço SAE 1005 modificado e a temperatura de formação das espiras desse material no laminador da Gerdau Riograndense.

Na sequência, em uma segunda etapa do experimento foram realizadas variações já conhecidas na temperatura de formação das espiras e foi feita a verificação da variação das mesmas propriedades mecânicas desse material, com o intuito de inferir a sua

aplicabilidade para a produção de arames recozidos, desde que atenda às especificações da norma e esteja alinhado com as melhores práticas do mercado.

No experimento foram coletadas amostras em pontos específicos do laminador e os parâmetros de controle serão alterados e medidos através de software dedicado ao controle do laminador.

3.2. Materiais

Os materiais do estudo em questão são os aços SAE 1005 e SAE 1405 modificados, laminados em fio-máquina 5,50 mm. A Tabela 3.2 apresenta as suas composições químicas nominais.

Tabela 3.1 Composição química dos aços (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 2000).

Designação COPANT do aço	Composição química (% em massa)			
	Carbono (C)	Manganês (Mn)	Fósforo (P) máx.	Enxofre (S) máx.
1005	0,06 máx.	0,35 máx.	0,040	0,050
1405	0,06 máx.	0,25-0,40	0,025	0,015

3.3. Equipamentos

Os principais equipamentos utilizados no processo de fabricação do fio-máquina 5,50 mm SAE 1005 modificado foram o Forno de Reaquecimento, o Laminador e as Zonas de Resfriamento. O fio-máquina 5,50 mm SAE 1405 modificado, foi produzido em outro laminador com os parâmetros e processo desconhecido, sendo parte do objeto de estudo a caracterização desse material.

3.3.1. Forno de Reaquecimento

O material foi laminado em um forno de reaquecimento industrial do tipo walking hearth, ou soleira caminante, da marca Italimpianti, cujo combustível utilizado é o gás natural, com queimadores na abóboda nas zonas de aquecimento e encharque.

O controle da temperatura do forno e do tempo de permanência é dado através de curvas de reaquecimento por tipo de aço e condição inicial de temperatura dos tarugos.

3.3.2. Laminador

O material foi laminado em um trem de laminação misto, composto por desbaste aberto, desbaste e intermediário contínuos, bloco acabador e formador de espiras.

O desbaste aberto é constituído de uma gaiola trio com 5 passes. Na sequência, o desbaste e intermediário contínuos possuem 9 gaiolas de laminação e o bloco acabador de dez gaiolas.

O laminador ainda apresenta duas tesouras de desponte, 2 zonas de resfriamento e um formador de espiras, como pode ser visto na representação esquemática da Figura 3.2.



Figura 3.1 Representação esquemática do laminador de rolos onde foram realizados os testes.

3.4. Amostragem para Caracterização Inicial

3.4.1. Amostragem para Caracterização das Propriedades Mecânicas dos Materiais

Foram coletadas 10 amostras de 3 lotes do FM 5,50mm SAE 1005 modificado em condições normais de produção e 10 amostras de 3 lotes do FM 5,50mm SAE 1405 modificado em condições desconhecidas, totalizando 60 amostras. O principal objetivo é a caracterização das propriedades mecânicas, principalmente o limite de resistência para inferir a aplicabilidade do FM 5,00 SAE 1005 modificado para a produção de arames recozidos atendendo as expectativas do mercado. As amostras foram organizadas conforme plano de amostragem ilustrado na Tabela 3.3.

Tabela 3.2 Plano de amostragem para caracterização dos materiais.

Material	Lote / Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SAE 1005 mod.	Lote 1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10
	Lote 2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10
	Lote 3	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10
SAE 1405 mod.	Lote 4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	4.10
	Lote 5	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	5.10
	Lote 6	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	6.9	6.10

3.4.2. Amostragem para Teste da Alteração de Parâmetros no Laminador com o Aço SAE 1005 Modificado

Depois de alterados os parâmetros do laminador, conforme procedimento experimental, foram coletadas 30 novas amostras do FM 5,50 mm SAE 1005 modificado com a condição experimental 1 e outras 30 amostras do mesmo material com a condição experimental 2. Para a condição experimental 1 será utilizado apenas 50% da vazão de água das zonas de resfriamento do que é utilizado na condição padrão de trabalho. Já na condição experimental 2 as amostras serão laminadas sem resfriamento, com 0% de vazão das zonas de resfriamento. As amostras foram organizadas conforme plano de amostragem ilustrado na Tabela 3.4.

Tabela 3.3 Plano de amostragem para caracterização do material nos testes.

SAE 1005 modificado	Lote / Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Condição experimental 1	Lote 1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10
	Lote 2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10
	Lote 3	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10
Condição experimental 2	Lote 4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	4.10
	Lote 5	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	5.10
	Lote 6	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	6.9	6.10

3.5. Coleta de Dados

Os dados de temperatura e vazão de água dos ensaios foram coletados através pirômetros e medidores de vazão instalados no laminador nos locais definidos conforme a Tabela 3.4. Além disso, todas as amostras foram coletadas no mesmo local.

Tabela 3.4 Pontos de medição e coleta de amostras.

Equipamentos	Temperatura			Vazão d'água		Amostragem
	Desenfornamento	5° Passe	Formador de Espiras	Z1	Z2	
Saída do Forno de Reaquecimento	X					
Saída do Desbaste Aberto		X				
Após o Formador de Espiras			X			
Zona de Resfriamento 1				X		
Zona de Resfriamento 2					X	
Coletor de Espiras						X

3.6. Ensaio em Geral

Os materiais foram submetidos a ensaios de tração uniaxial para determinação das forças e limites de escoamento e resistência (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 2002). Cada lote foi dividido em 10 amostras para obtenção de valores médios e os respectivos desvios associados. Para este ensaio as amostras foram cortadas com um comprimento de 500mm. A aquisição dos dados foi realizada via software comercial instalado junto à máquina de ensaios de tração (Figura 3.3).



Figura 3.2 Máquina de ensaio de tração uniaxial EMIC 10.000.

A microestrutura das amostras foi examinada em seção transversal. As amostras foram cortadas com disco abrasivo com lubrificação, em uma máquina denominada Cut Off, marca Arotec. Após o corte, as amostras foram embutidas a quente utilizando uma máquina da marca Arotec, modelo PRE40, e lixadas com lixas d'água de granulometria #220, #320, #400 e #600 em lixadeira rotativa. As amostras foram então polidas com pasta sintética de diamante de 6 e 2 μ m, marca (Pantec – Polipan2) Panambra.

Ao final do preparo, as amostras polidas foram quimicamente atacadas com reativo Nital 2% (20ml de ácido nítrico e 980ml álcool etílico) conforme procedimento convencional para análise metalográfica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização do FM 5,50mm SAE 1405 modificado

A primeira etapa do trabalho consistiu na verificação da composição química e das propriedades mecânicas do FM 5,50mm SAE 1405 modificado como apresentado nas Tabela 4.1 a 4.2 e Figura 4.1 a 4.9.

A Tabela 4.1 nos mostra as composições químicas das 3 amostras do FM 5,50mm SAE 1405 modificado. Podemos perceber que a composição química está praticamente dentro dos limites estabelecidos pela norma, com variação irrelevante no percentual enxofre (S).

Tabela 4.1 Composição química das amostras do FM 5,50mm SAE 1405 modificado (% em massa).

Amostra	C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo	Sn	Nb	V	Sn	B
1	0,04	0,33	0,09	0,008	0,013	0,020	0,013	0,018	<0,001	0,003	0,001	<0,001	0,003	0,005
2	0,04	0,34	0,07	0,006	0,017	0,017	0,001	0,010	<0,001	0,003	0,001	<0,001	0,003	0,003
3	0,05	0,33	0,08	0,009	0,014	0,015	0,006	0,010	<0,001	0,003	0,001	<0,001	0,003	0,002

Na análise das propriedades mecânicas foi determinado o limite de resistência à tração das amostras conforme a Figura 4.1 e Tabela 4.2. Comparando-se o limite de resistência do FM ao do arame recozido vemos que o valor está, em média, 50 MPa abaixo do que se pratica no mercado (GERDAU 2011).

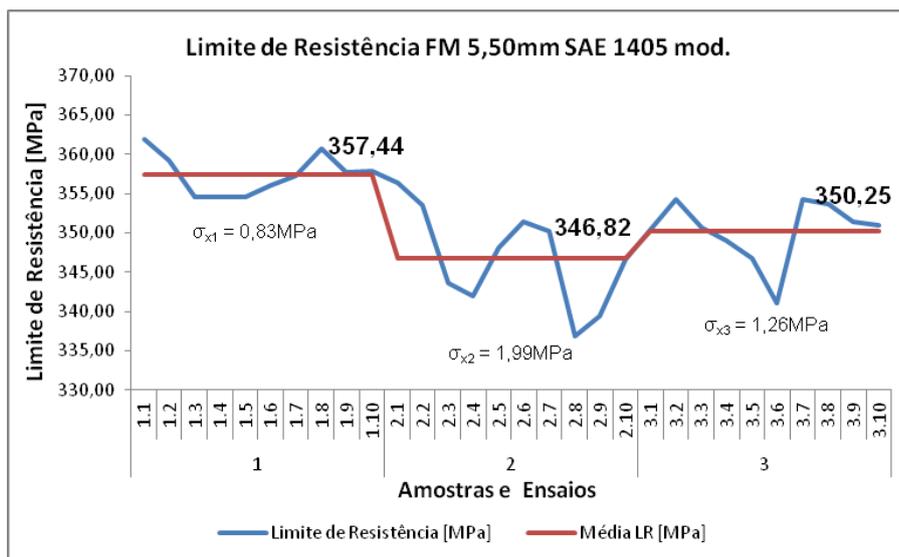


Figura 4.1 Limite de resistência do FM 5,50mm SAE 1405 modificado.

Tabela 4.2 Médias e desvios do limite de resistência dos ensaios do FM 5,50mm SAE 1005 modificado.

Amostra	Média LR Ensaio [MPa]	Desvio Padrão dos Ensaio [MPa]	Desvio Médio de LR [MPa]	Resultado por Amostra [MPa]	Média FM 5,50 SAE 1405 mod. [MPa]
1	357,4	2,6	0,8	357,4±0,8	351,5±2,4
2	346,8	6,3	1,9	346,8±1,9	
3	350,2	3,9	1,2	350,2±1,2	

Pela análise dos resultados da Tabela 4.2 percebe-se que o limite de resistência do material produzido com o aço SAE 1405 modificado apresenta uma pequena variabilidade, validado pelo pequeno desvio padrão.

Em relação ao tamanho dos grãos observa-se, conforme Figura 4.2, que o tamanho médio dos grãos desse material foi de $376 \pm 352 \mu\text{m}$. Essa variabilidade é explicada por uma das amostras que apresentou tamanho de grão bastante distinto dos demais, puxando a média e seu desvio para um valor maior.

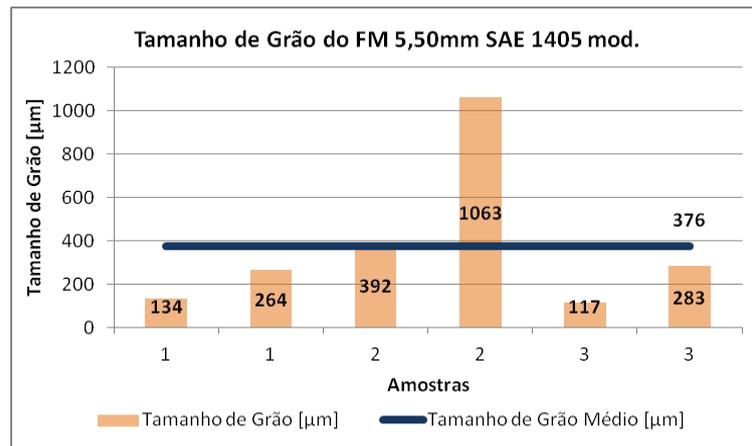


Figura 4.2 Tamanho de grão do FM 5,50mm SAE 1405 modificado.

As Figuras 4.3 a 4.5 apresentam a microestrutura observada na secção transversal do material, após ataque químico com Nital 2%, observaram-se estruturas heterogêneas apresentando ferrita e perlita.

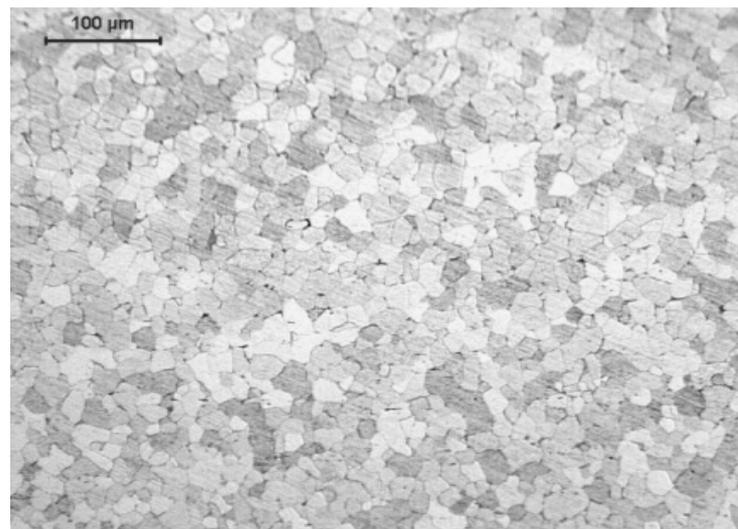


Figura 4.3 Micrografia da amostra 1, tamanho de grãos entre 134 μm e 264 μm .

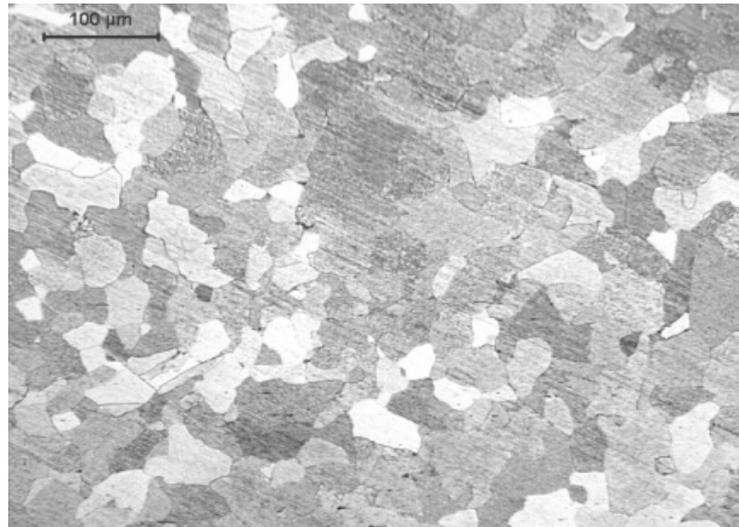


Figura 4.4 Micrografia da amostra 2, tamanho de grãos heterogêneos entre 392μm e 1063μm.

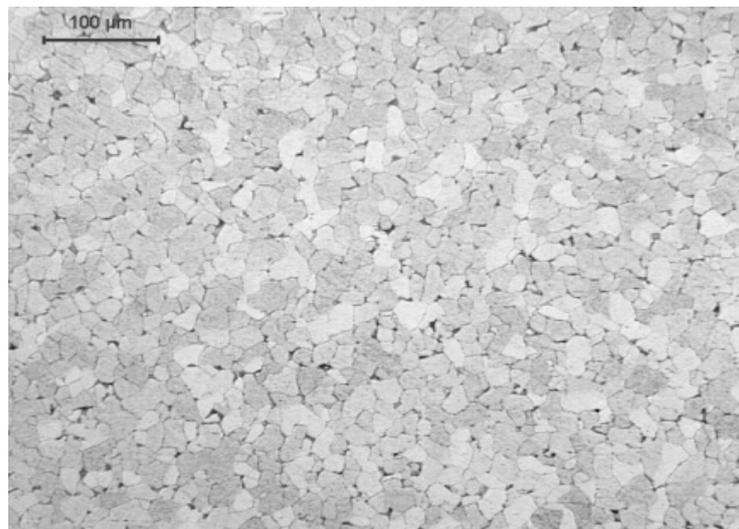


Figura 4.5 Micrografia da amostra 3, tamanho de grãos entre 117μm e 283μm.

Na análise metalográfica verificou-se que a camada de óxidos formada é constituída de diferentes óxidos como pode ser observado nas Figuras 4.6 a 4.8, porém não foi possível identificar os óxidos e sua constituição na microscopia óptica.

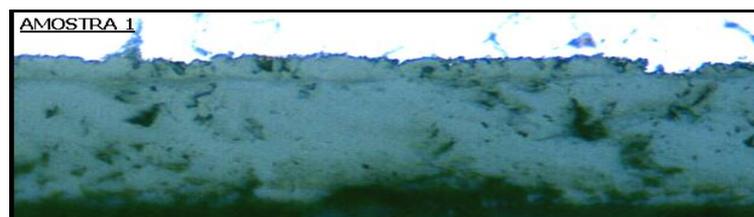


Figura 4.6 Camada de óxidos da amostra 1 (ampliação 1000x).



Figura 4.7 Camada de óxidos da amostra 2 (ampliação 1000x).

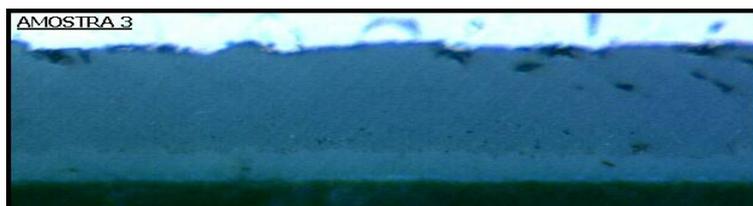


Figura 4.8 Camada de óxidos da amostra 3 (ampliação 1000x).

Evidenciou-se, também, a espessura do filme de óxidos, com medições em 2 pontos por amostra, conforme a Figura 4.9, onde obtivemos em média $36,14 \pm 3,71 \mu\text{m}$ de espessura.

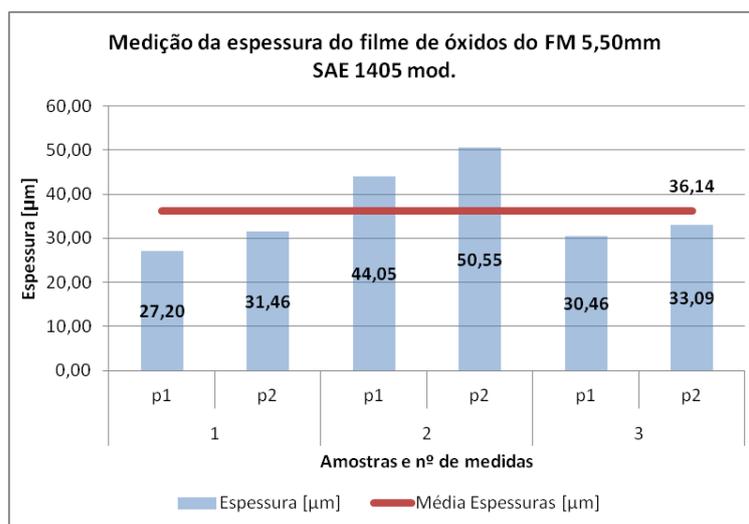


Figura 4.9 Medição da espessura do filme de óxidos do FM 5,50mm SAE 1405 mod.

4.2. Caracterização do FM 5,50mm SAE 1005 Modificado

Nessa segunda etapa verificou-se a composição química e as propriedades mecânicas do FM 5,50mm SAE 1005 modificado como apresentado na Tabela 4.3 e Figuras 4.8 a 4.14.

A Tabela 4.3 nos mostra as composições químicas das 3 amostras do FM 5,50mm SAE 1005 modificado. Da mesma forma que a análise do outro aço, as composições químicas encontradas estão praticamente dentro dos limites estabelecidos pela norma, com pequena variação no percentual de manganês (Mn).

Tabela 4.3 Composição química das amostras do FM 5,50mm SAE 1005 modificado (% em massa).

Amostra	C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo	Sn	Nb	V	N (ppm)
4	0,04	0,51	0,16	0,012	0,028	0,032	0,016	<0,001	<0,001	0,003	<0,001	<0,001	33
5	0,05	0,40	0,13	0,011	0,021	0,023	0,008	<0,001	<0,001	0,004	<0,001	<0,001	38
6	0,06	0,46	0,15	0,011	0,031	0,025	0,019	<0,001	<0,001	0,003	<0,001	<0,001	22

Na análise das propriedades mecânicas foi determinado o limite de resistência à tração das amostras conforme o gráfico da Figura 4.9. Comparando-se o limite de resistência do FM ao do arame recozido vemos que o valor médio obtido no material produzido com aço SAE 1005 modificado foi $392,4 \pm 1,9\text{MPa}$ (Tabela 4.3) e está muito próximo do que se pratica no mercado (GERDAU 2011).

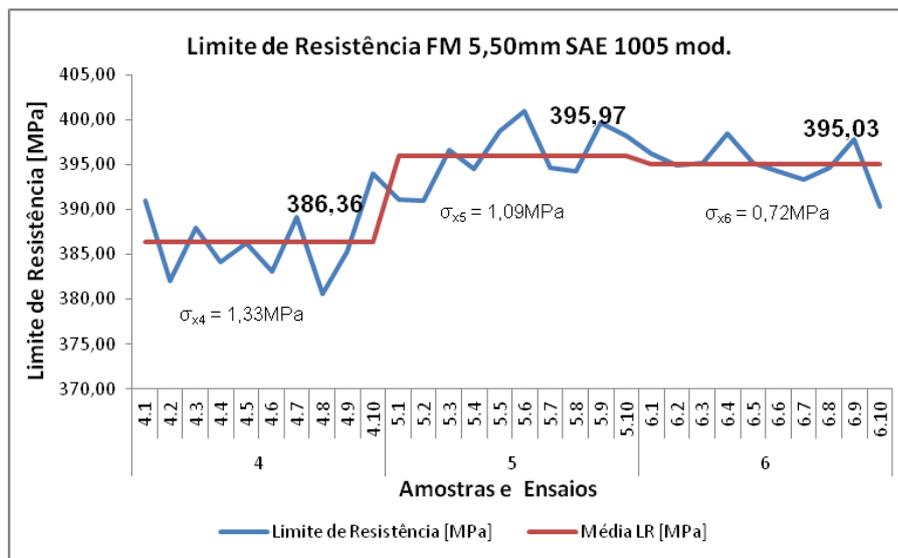


Figura 4.10 Limite de resistência do FM 5,50mm SAE 1005 modificado.

Tabela 4.4 Médias e desvios do limite de resistência dos ensaios do FM 5,50mm SAE 1005 modificado.

Amostra	Média LR Ensaios [MPa]	Desvio Padrão dos Ensaios [MPa]	Desvio Médio de LR [MPa]	Resultado por Amostra [MPa]	Média FM 5,50 SAE 1005 mod. [MPa]
4	386,4	4,2	1,3	386,4±1,3	392,4±1,9
5	395,9	3,4	1,1	395,9±1,1	
6	395,0	2,3	0,7	395,0±0,7	

Em relação ao tamanho dos grãos observa-se, conforme Figura 4.11, que o tamanho médio dos grãos desse material foi de $257 \pm 159 \mu\text{m}$.

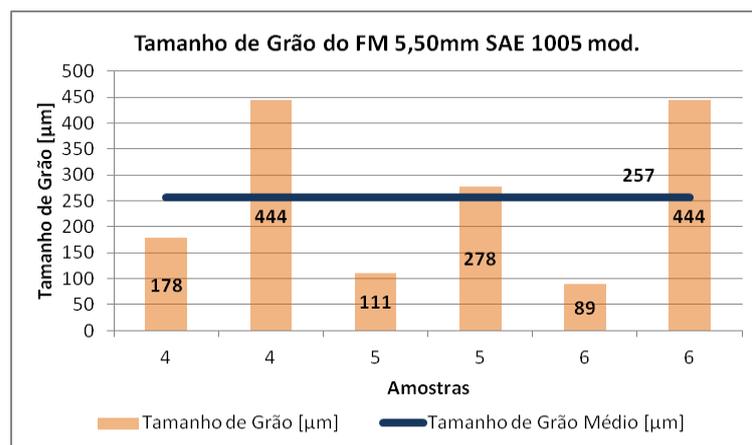


Figura 4.11 Tamanho de grão do FM 5,50mm SAE 1005 modificado.

As Figuras 4.12 a 4.14 apresentam a microestrutura da secção transversal do material, após ataque químico com Nital 2%, observamos estruturas heterogêneas apresentando grãos de ferrita e perlita.

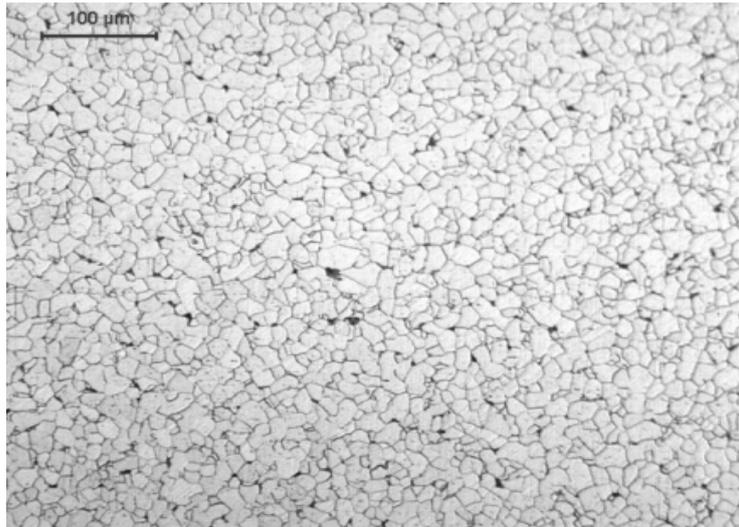


Figura 4.12 Micrografia da amostra 4, tamanho de grãos entre 178µm e 444µm.

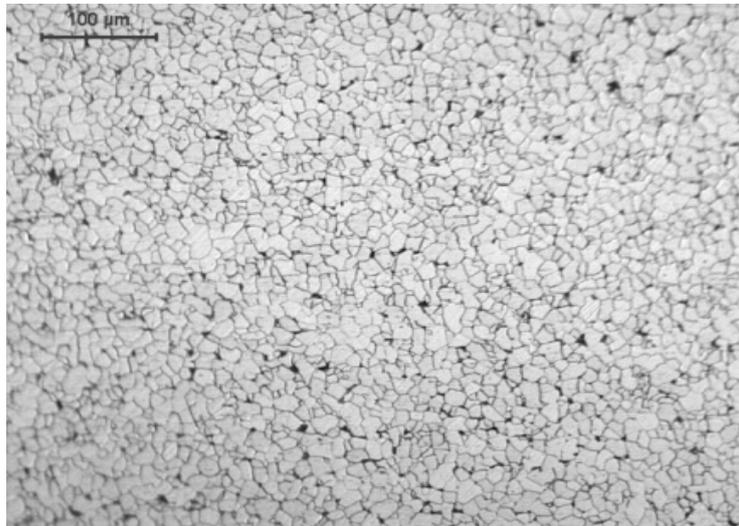


Figura 4.13 Micrografia da amostra 5, tamanho de grãos entre 111µm e 278µm.

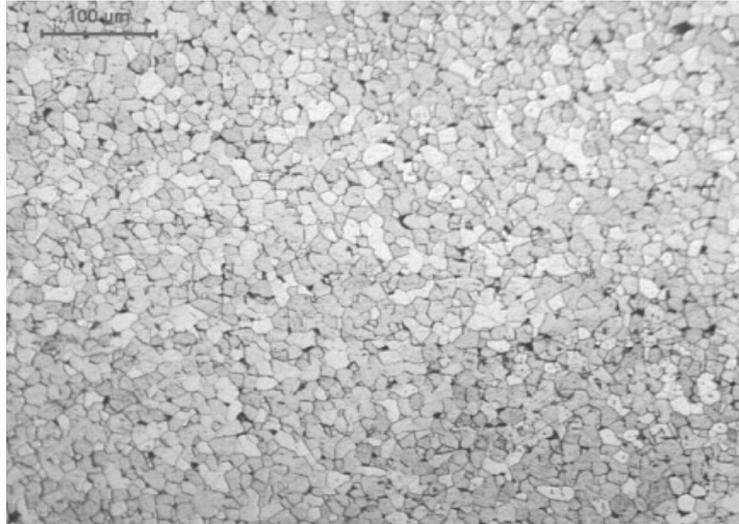


Figura 4.14 Micrografia da amostra 6, tamanho de grãos entre 89µm e 444µm.

Na análise metalográfica verificou-se que a camada de óxidos formada é constituída de diferentes óxidos como pode ser observado a seguir nas Figuras 4.15 a 4.17, porém não foi possível identificar os óxidos e sua constituição na microscopia óptica.

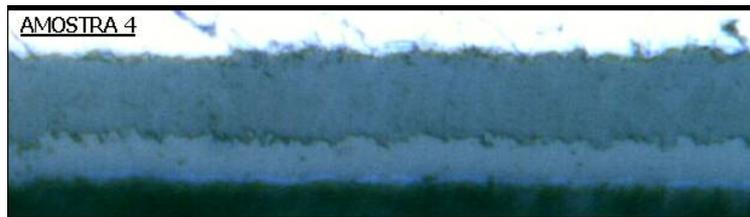


Figura 4.15 Camada de óxidos da amostra 4 (ampliação 1000x).

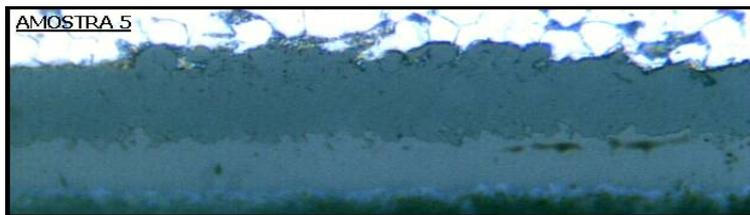


Figura 4.16 Camada de óxidos da amostra 5 (ampliação 1000x).



Figura 4.17 Camada de óxidos da amostra 6 (ampliação 1000x).

Evidenciou-se também a espessura do filme de óxidos, com medições em 2 pontos por amostra, conforme a Figura 4.18, onde obtivemos em média $26,44 \pm 1,42 \mu\text{m}$ de espessura.

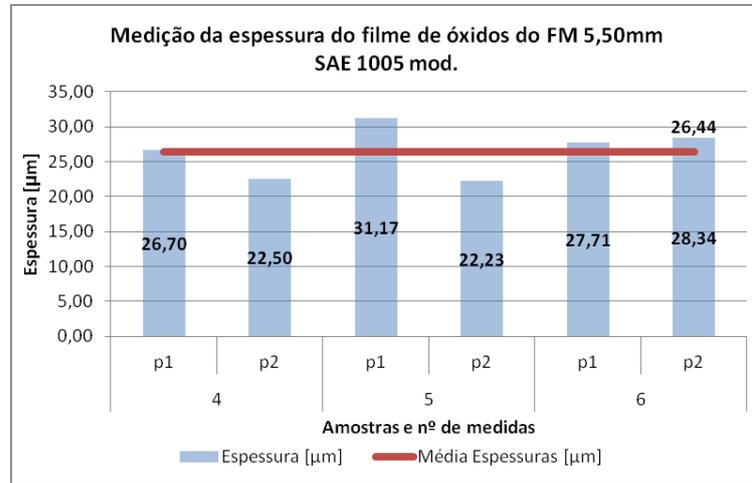


Figura 4.18 Medição da espessura do filme de óxidos do FM 5,50mm SAE 1005 mod.

4.3. Comparativo entre o Limite de Resistência e a Temperatura no Formador de Espiras para o FM 5,50mm SAE 1005 modificado

Durante a laminação do FM 5,50mm SAE 1005 modificado, foram observados os parâmetros operacionais do laminador e verificou-se uma pequena relação inversa entre o limite de resistência e a temperatura de formação das espiras, conforme mostra a Figura 4.19.

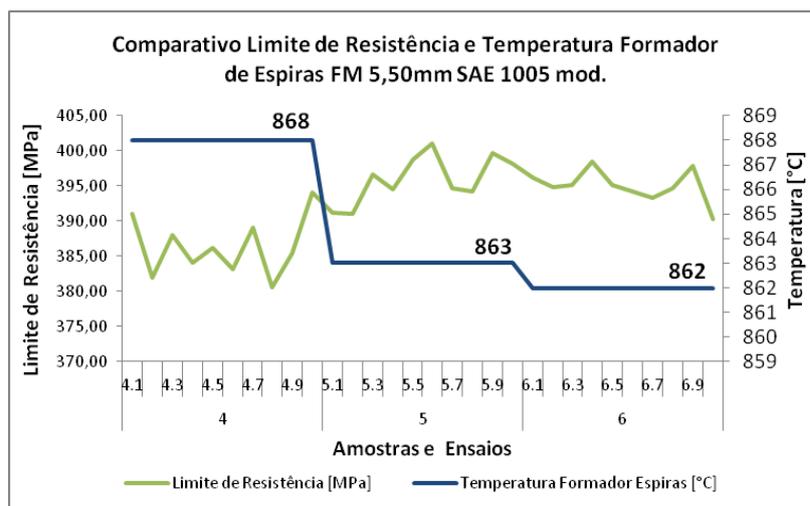


Figura 4.19 Comparativo entre o limite de resistência e a temperatura no formador de espiras para o FM 5,50mm SAE 1005 modificado.

A temperatura da barra no formador de espiras indica o quanto o material foi resfriado após ter sido definida a sua bitola final. Logo após ter sido laminado no bloco acabador o material passa por zonas de resfriamento onde recebe uma quantidade de água suficiente para determinar a temperatura desejada do material para que sejam formadas as espiras e ocorra o conseqüente resfriamento ao longo da esteira transportadora.

No caso em questão, a pequena relação inversa nos permite inferir que haja uma relação entre o resfriamento e o limite de resistência. Essa hipótese será avaliada ao longo dos próximos testes, sendo o principal motivo do estudo.

4.4. Condição Experimental 1 – 50% Água nas Zonas de Resfriamento

Na condição experimental 1, regulou-se a vazão de água das zonas de resfriamento com 50% de sua capacidade e verificou-se a composição química e as propriedades mecânicas do FM 5,50mm SAE 1005 modificado como apresentado nas Tabelas 4.5 a 4.6 e Figuras 4.20 a 4.29.

A Tabela 4.5 nos mostra a composição química da amostra do FM 5,50mm SAE 1005 modificado nessa condição. Como já era esperada, a composição química encontrada está praticamente dentro dos limites estabelecidos pela norma, apresentando uma pequena variação no percentual de manganês (Mn) que já havia sido verificada no mesmo material anteriormente.

Tabela 4.5 Composição química da amostra do FM 5,50mm SAE 1005 modificado – Condição experimental 1 (% em massa).

Amostra	C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo	Sn	Nb	V
7	0,04	0,47	0,17	0,018	0,026	0,034	0,015	0,01	0,006	0,002	0,003	0,001
8	0,04	0,47	0,17	0,018	0,026	0,034	0,015	0,01	0,006	0,002	0,003	0,001
9	0,04	0,47	0,17	0,018	0,026	0,034	0,015	0,01	0,006	0,002	0,003	0,001

Nas amostras analisadas, os elementos estanho, nióbio e vanádio apresentaram concentração < 0,003%.

Na análise das propriedades mecânicas foi determinado o limite de resistência à tração das amostras conforme a Figura 4.20.

Como já era esperado o resultado do limite de resistência das amostras do FM 5,50mm da condição experimental 1 nos mostra que, com uma pequena diminuição na quantidade de água para o resfriamento do material, já foi possível obter uma sensível redução no limite de resistência, visto que se confirma o mecanismo de endurecimento relacionado ao controle do tamanho de grãos.

Nesse caso, estamos utilizando o mecanismo para obter um resultado de “amolecimento” do material ao provocarmos um aumento no tamanho de grão, pelo maior tempo no qual o material permanecerá em temperaturas altas ao longo da esteira transportadora.

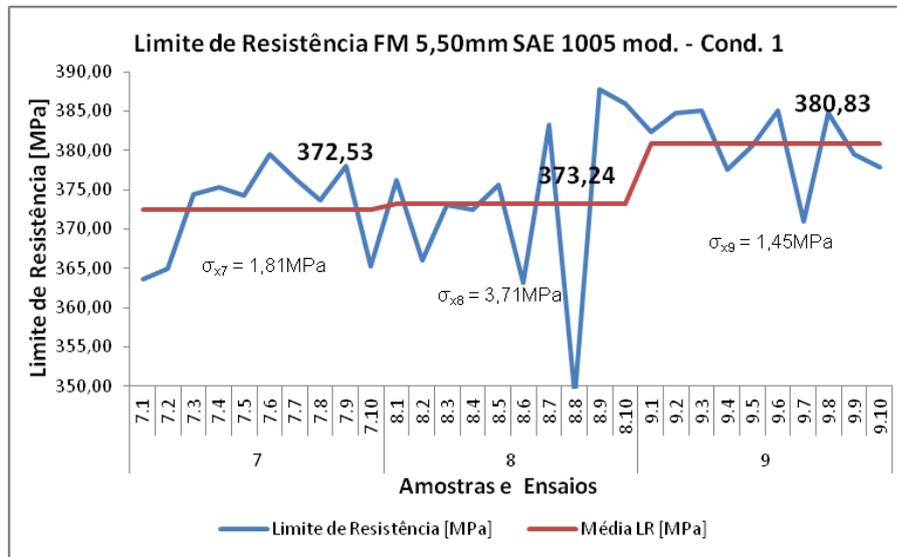


Figura 4.20 Variação do limite de resistência do FM 5,50mm SAE 1005 modificado – Condição experimental 1.

Tabela 4.6 Médias e desvios do limite de resistência dos ensaios do FM 5,50mm SAE 1005 modificado – Condição experimental 1.

Amostra	Média LR Ensaios [MPa]	Desvio Padrão dos Ensaios [MPa]	Desvio Médio de LR [MPa]	Resultado por Amostra [MPa]	Média FM 5,50 SAE 1005 mod. – Cond. 1 [MPa]
7	372,5	5,7	1,8	372,5±1,8	375,5±4,4
8	373,2	11,7	3,7	373,2±3,7	
9	380,8	4,6	3,2	380,8±3,2	

Em relação ao tamanho dos grãos observa-se, conforme Figura 4.21, que o tamanho médio dos grãos desse material foi de $613 \pm 196 \mu\text{m}$, apresentando um aumento significativo de tamanho, mesmo que o número de amostras não torne o resultado tão representativo.

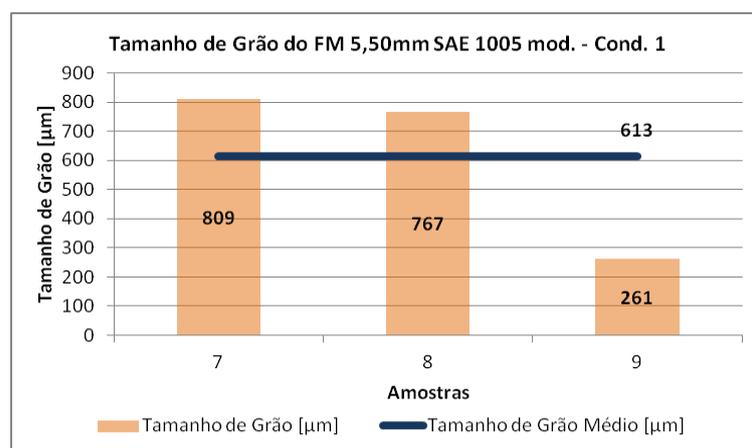


Figura 4.21 Tamanho de grão do FM 5,50mm SAE 1005 modificado. – Condição experimental 1.

As Figuras 4.22 a 4.24 apresentam a microestrutura da secção transversal do material, após ataque químico com Nital 2%, observamos estruturas heterogêneas apresentando grãos de ferrita e perlita.

As estruturas de ferrita e perlita apresentam tamanhos de grãos heterogêneos devido às condições forçadas de resfriamento, já que não é o usual de trabalho do laminador em

questão, cabendo ajustes na estabilidade da vazão de água e controle de resfriamento para obtenção de estruturas mais homogêneas.

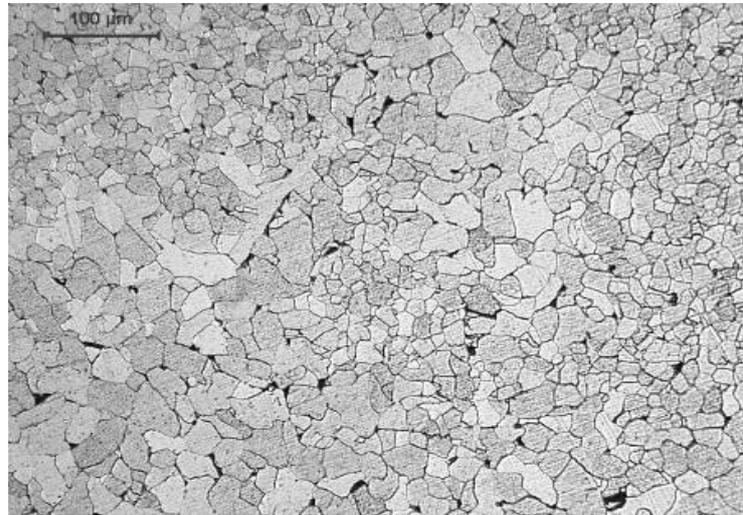


Figura 4.22 Micrografia da amostra 7, tamanho de grãos 36% entre 55,6 μ m e 111 μ m, 25% entre 611 μ m e 944 μ m e 39% maiores que 1500 μ m.

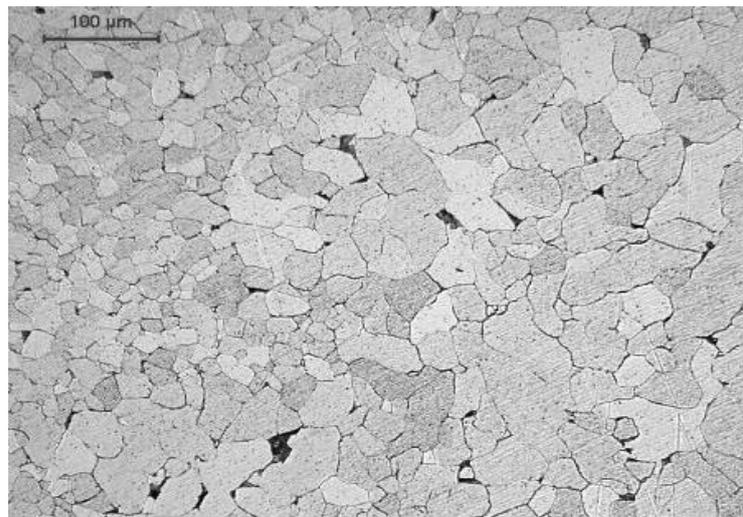


Figura 4.23 Micrografia da amostra 8, tamanho de grãos 29% entre 55,6 μ m e 133 μ m, 47% entre 525 μ m e 1092 μ m e 24% maiores que 1500 μ m.

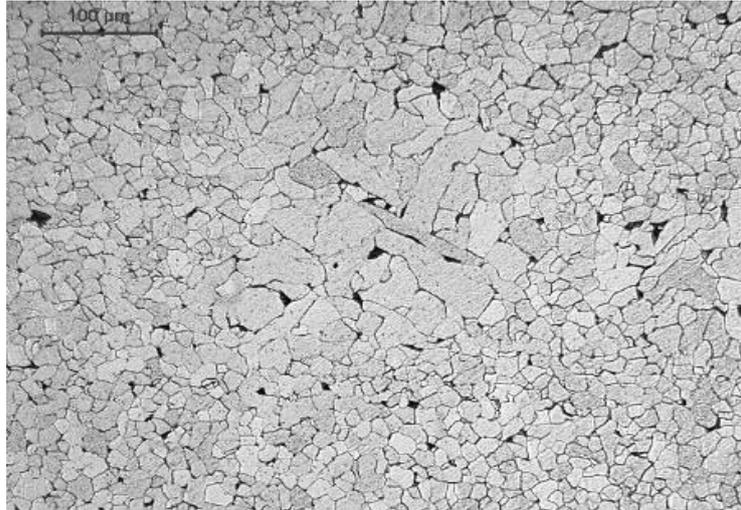


Figura 4.24 Micrografia da amostra 9, tamanho de grãos 38% entre 77,9µm e 126µm, 55% entre 175µm e 253µm e 7% maiores que 1500µm.

Na análise metalográfica verificou-se que a camada de óxidos formada é constituída de diferentes óxidos como pode ser observado a seguir nas Figuras 4.25 a 4.27, porém não foi possível identificar os óxidos e sua constituição na microscopia óptica.

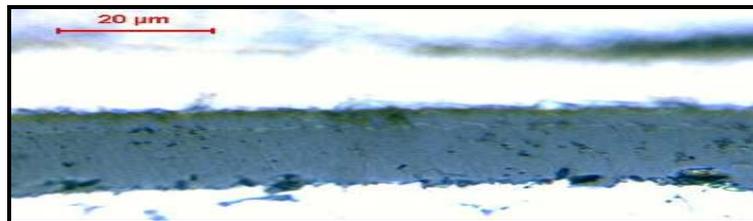


Figura 4.25 Camada de óxidos da amostra 7 (ampliação 1000x).

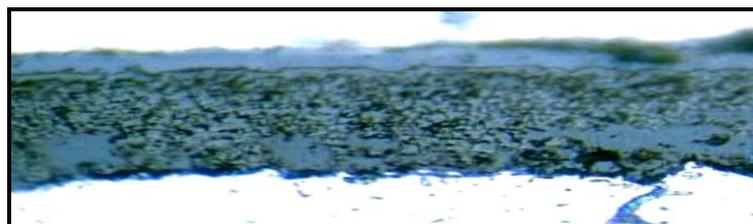


Figura 4.26 Camada de óxidos da amostra 8 (ampliação 1000x).



Figura 4.27 Camada de óxidos da amostra 9 (ampliação 1000x).

Apesar de não ter sido possível identificarmos os óxidos presentes e suas respectivas composições, podemos observar claramente que a espessura do filme de óxidos gerados na condição experimental 1 são 33% maiores que a condição normal de produção do FM 5,50mm SAE 1005 modificado. Isso nos indica que ao permanecer maior tempo em temperaturas altas e sob o contato de atmosfera oxidante, o material terá maior disposição para oxidar.

Evidenciou-se também a espessura do filme de óxidos, com medições em 2 pontos por amostra, conforme a Figura 4.28, onde obtivemos em média $35,19 \pm 6,14 \mu\text{m}$ de espessura.

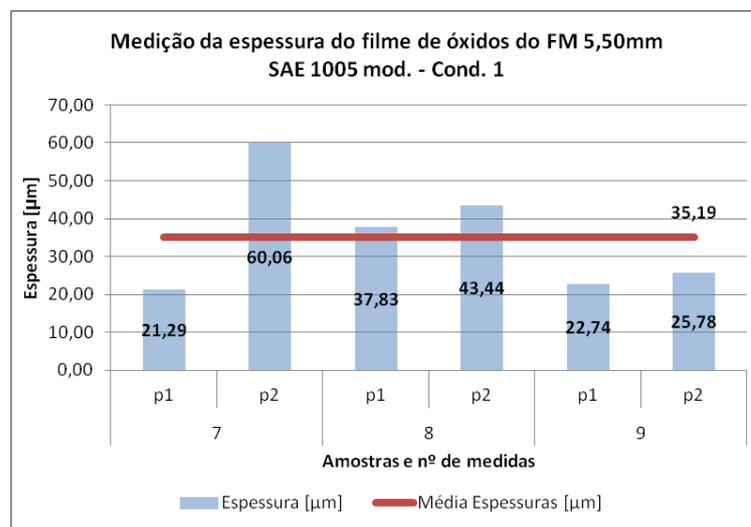


Figura 4.28 Medição da espessura do filme de óxidos do FM 5,50mm SAE 1005 modificado – Condição experimental 1.

Observando a relação entre a temperatura da barra no formador de espiras e o limite de resistência do material para a condição experimental 1 vemos, através da Figura 4.29, que ainda é válida a relação inversa entre a temperatura e o limite de resistência.

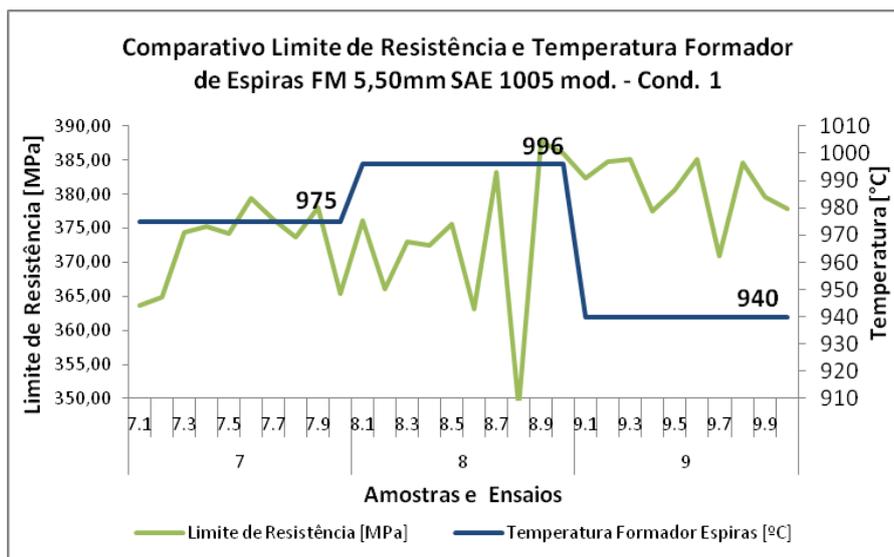


Figura 4.29 Comparativo entre o limite de resistência e a temperatura no formador de espiras para o FM 5,50mm SAE 1005 mod. – Condição experimental 1.

4.5. Condição Experimental 2 – 0% de Água nas Zonas de Resfriamento

Na condição experimental 2, foram fechadas totalmente as válvulas de água, obtendo 0% de água nas zonas de resfriamento e verificou-se a composição química e as propriedades mecânicas do FM 5,50mm SAE 1005 modificado como apresentado nas Tabelas 4.7 a 4.8 e Figuras 4.23 a 4.29.

A Tabela 4.7 nos mostra a composição química da amostra do FM 5,50mm SAE 1005 modificado nessa condição. Como já era esperada, a composição química encontrada está praticamente dentro dos limites estabelecidos pela norma, apresentando também a pequena variação no percentual de manganês (Mn) que já havia sido verificada no mesmo material anteriormente.

Tabela 4.7 Composição química da amostra do FM 5,50mm SAE 1005 modificado – Condição experimental 2 (% em massa).

Amostra	C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo	Sn	Nb	V
10	0,05	0,51	0,17	0,017	0,027	0,044	0,009	0,008	0,002	0,003	0,003	0,001
11	0,05	0,51	0,17	0,017	0,027	0,044	0,009	0,008	0,002	0,003	0,003	0,001
12	0,05	0,51	0,17	0,017	0,027	0,044	0,009	0,008	0,002	0,003	0,003	0,001

Na análise das propriedades mecânicas foi determinado o limite de resistência à tração das amostras conforme o gráfico da Figura 4.30.

Da mesma forma que na condição experimental 1 o resultado do limite de resistência das amostras do FM 5,50mm da condição experimental 2 nos mostra uma sensível redução no limite de resistência, visto que se confirma o mecanismo de endurecimento relacionado ao controle do tamanho de grãos. Porém, esperava-se um maior efeito do pouco resfriamento sobre o limite de resistência.

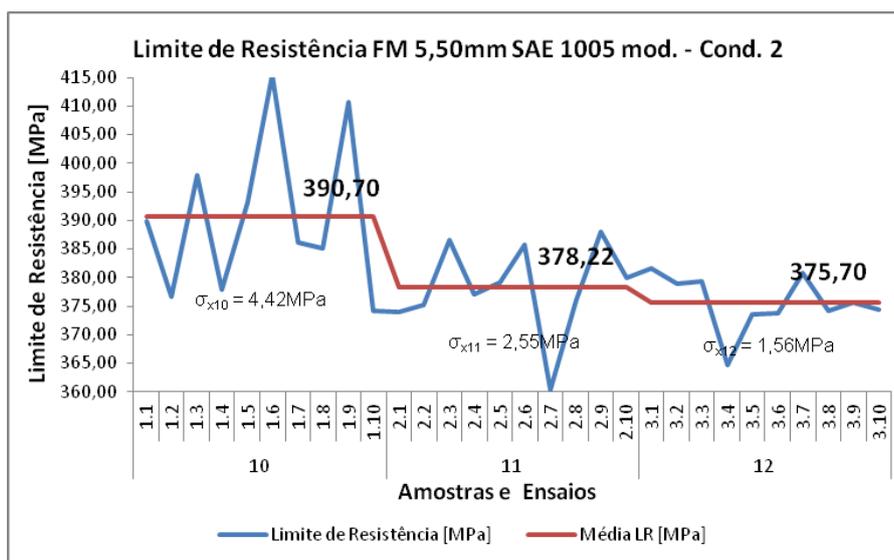


Figura 4.30 Variação do limite de resistência do FM 5,50mm SAE 1005 modificado – Condição experimental 2.

Tabela 4.8 Médias e desvios do limite de resistência dos ensaios do FM 5,50mm SAE 1005 modificado – Condição experimental 1.

Amostra	Média LR Ensaios [MPa]	Desvio Padrão dos Ensaios [MPa]	Desvio Médio de LR [MPa]	Resultado por Amostra [MPa]	Média FM 5,50 SAE 1005 mod. – Cond. 2 [MPa]
10	390,7	13,9	4,4	390,7±4,4	381,5±5,3
11	378,2	8,0	2,5	378,2±2,5	
12	375,7	4,9	1,6	375,7±1,6	

Em relação ao tamanho dos grãos observa-se, conforme Figura 4.31, que o tamanho médio dos grãos desse material foi de $745 \pm 205 \mu\text{m}$, apresentando também um aumento significativo de tamanho, mesmo que o número de amostras não torne o resultado tão representativo.

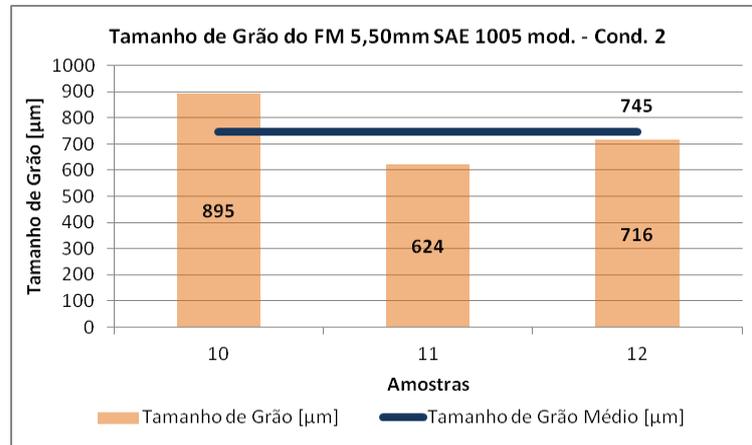


Figura 4.31 Tamanho de grão do FM 5,50mm SAE 1005 modificado. – Condição experimental 2.

As Figuras 4.32 a 4.34 apresentam a microestrutura da secção transversal do material, após ataque químico com Nital 2%, observamos estruturas heterogêneas apresentando grãos de ferrita e perlita.

As estruturas de ferrita e perlita apresentam tamanhos de grãos heterogêneos devido às condições forçadas de resfriamento, já que não é o usual de trabalho do laminador em questão, cabendo verificação na estanqueidade das válvulas do sistema de resfriamento para obtenção de estruturas mais homogêneas.

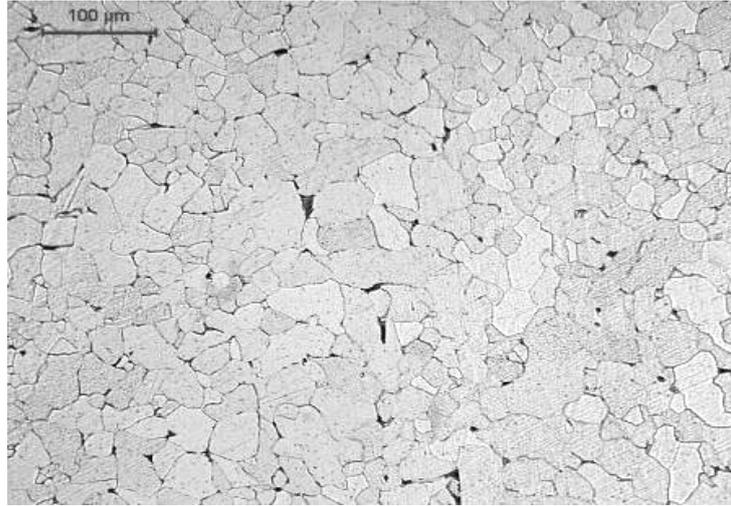


Figura 4.32 Micrografia da amostra 10, tamanho de grãos 17% entre 176 μ m e 425 μ m, 54% entre 508 μ m e 1007 μ m e 29% maiores que 1500 μ m.

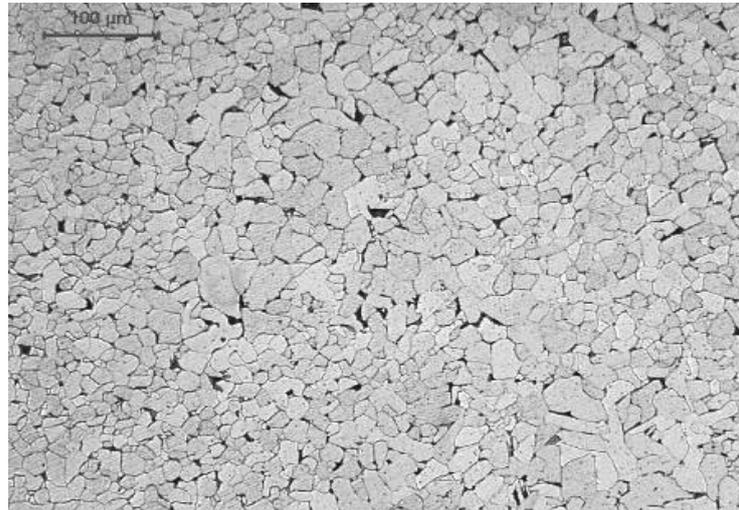


Figura 4.33 Micrografia da amostra 11, tamanho de grãos 42% entre 167 μ m e 500 μ m e 58% entre 584 μ m e 1084 μ m.

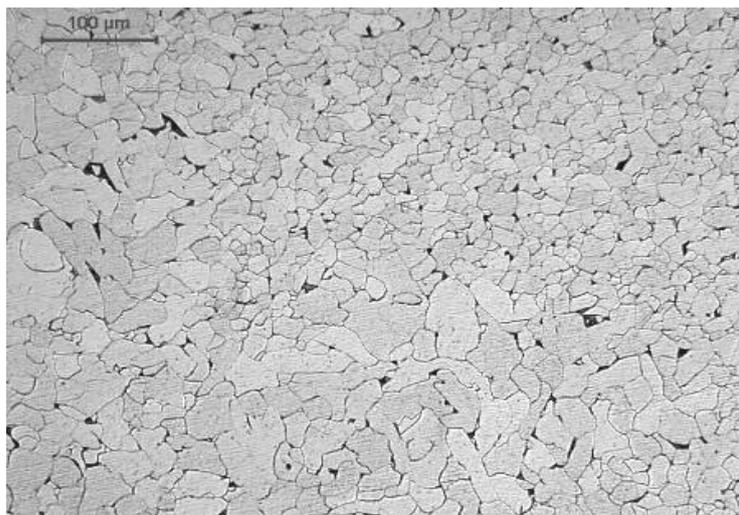


Figura 4.34 Micrografia da amostra 12, tamanho de grãos 25% entre 93μm e 259μm, 30% entre 342μm e 591μm e 55% entre 857 μm e 1090μm.

Na análise metalográfica verificou-se que a camada de óxidos formada é constituída de diferentes óxidos como pode ser observado a seguir nas Figuras 4.35 a 4.37, porém não foi possível identificar os óxidos e sua constituição na microscopia óptica.

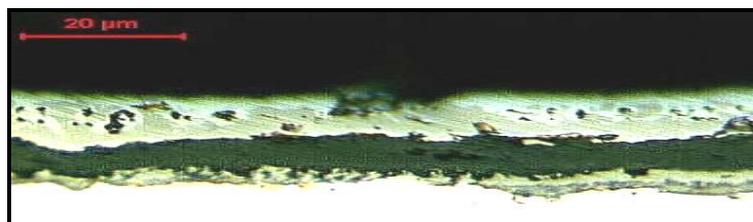


Figura 4.35 Camada de óxidos da amostra 10 (ampliação 1000x).

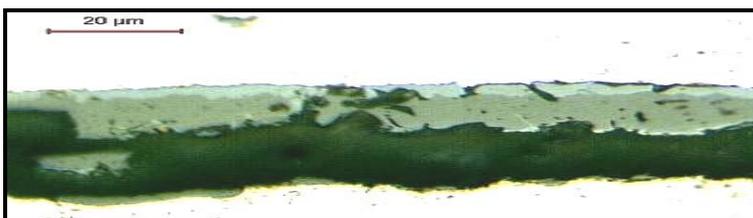


Figura 4.36 Camada de óxidos da amostra 11 (ampliação 1000x).

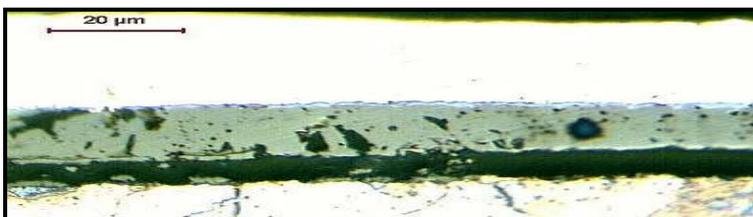


Figura 4.37 Camada de óxidos da amostra 12 (ampliação 1000x).

Evidenciou-se também a espessura do filme de óxidos, com medições em 2 pontos por amostra, conforme a Figura 4.38, onde obtivemos em média $30,49 \pm 6,30 \mu\text{m}$ de espessura.

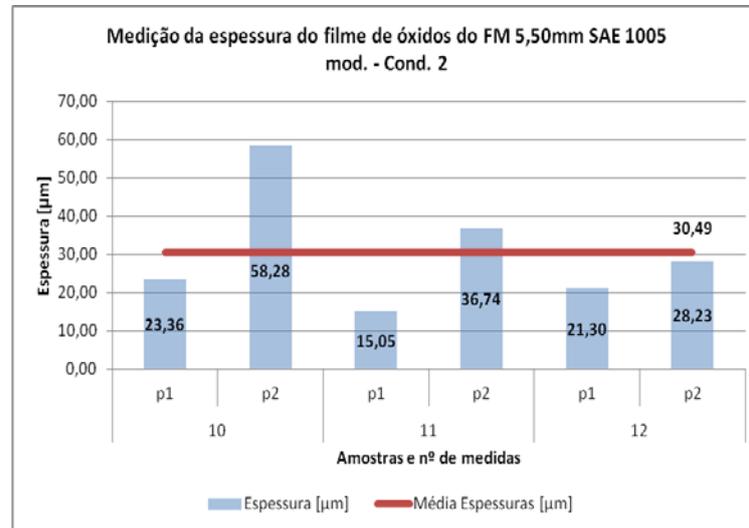


Figura 4.38 Medição da espessura do filme de óxidos do FM 5,50mm SAE 1005 modificado – Condição experimental 2.

Observando a relação entre a temperatura da barra no formador de espiras e o limite de resistência do material para a condição experimental 2 vemos, através da Figura 4.39, que não se manteve a relação inversa entre a temperatura e o limite de resistência, frustrando a expectativa de se obter uma maior redução no limite de resistência através de um menor resfriamento.

Deve-se levar em conta que para a realização dos testes foram apenas ajustados os parâmetros de controle do laminador para que não houvessem outras variáveis, porém com a obtenção de um resultado desfavorável como este, surge a necessidade de validação das condições de estanqueidade das válvulas de água do sistema de resfriamento, para que tal teste tenha maior confiabilidade.

Tal provável descontrole no sistema de resfriamento já havia sido verificado na variação do tamanho de grãos.

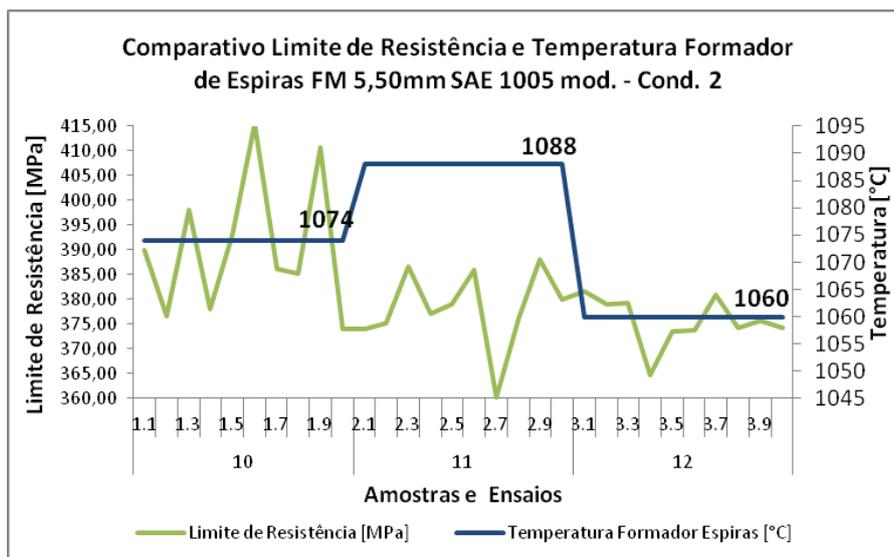


Figura 4.39 Comparativo entre o limite de resistência e a temperatura no formador de espiras para o FM 5,50mm SAE 1005 mod. – Condição experimental 2.

4.6. Comparativo do FM 5,50mm SAE 1005 Modificado nas Condições Padrão, Experimental 1 e Experimental 2.

Ao realizarmos uma comparação direta das médias dos limites de resistência das amostras de cada condição experimental e da condição padrão, verificamos através da Figura 4.40 que foi possível obter, através da experimentação, uma redução, ainda que pequena, nessa variável. Isso nos mostra claramente a relação existente entre as condições de resfriamento e a propriedade limite de resistência.

Porém, foi constatado novamente, que os resultados da condição experimental 2 foram, provavelmente, afetados por alguma outra variável durante o experimento, pois apresentam comportamento oposto ao esperado em relação ao FM na condição padrão. Além disso, o resultado é também oposto ao da condição experimental 1.

Analisando os experimentos pela ótica do tamanho de grãos (Figura 4.41) é possível dizer que o mecanismo de endurecimento em metais pela redução do tamanho de grãos é verificado na comparação entre o FM 5,50mm produzido com o aço SAE 1405 modificado e o mesmo FM produzido com o aço SAE 1005 modificado, visto que uma vez que diminui o tamanho de grão (32% menor em média), aumenta o limite de resistência.

No primeiro experimento (condição experimental 1), foi possível obter um tamanho médio dos grãos de 613 μ m (138% maior em média) e verificou-se que o limite de resistência do material foi reduzido em 4%.

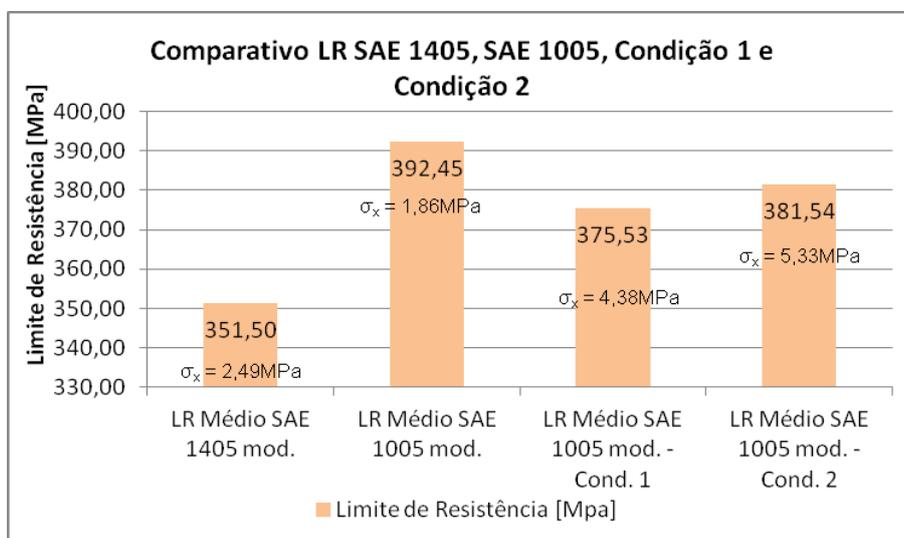


Figura 4.40 Comparativo entre os limites de resistência do FM 5,50mm SAE 1405 mod., SAE 1005 mod. na condição padrão e nas condições experimentais 1 e 2.

Porém, no segundo experimento (condição experimental 2), não obteve-se a mesma tendência no resultado. Isso nos mostra novamente que alguma variável não mensurada e medida durante o experimento sofreu variação e prejudicou o resultado, ocasionando um aumento no limite de resistência mesmo que houvesse um aumento no tamanho médio dos grãos.

Tabela 4.9 Médias e desvios dos limites de resistência dos materiais analisados.

Materiais	Limite de Resistência Médio [MPa]	Desvio Padrão Médio de LR [MPa]	Resultado do LR Médio [MPa]
SAE 1405 mod.	351,5	2,5	351,5±2,5
SAE 1005 mod.	392,4	1,9	392,4±1,9
SAE 1005 mod. Cond. 1	375,5	4,4	375,5±4,4
SAE 1005 mod. Cond. 2	381,5	5,3	381,5±5,3

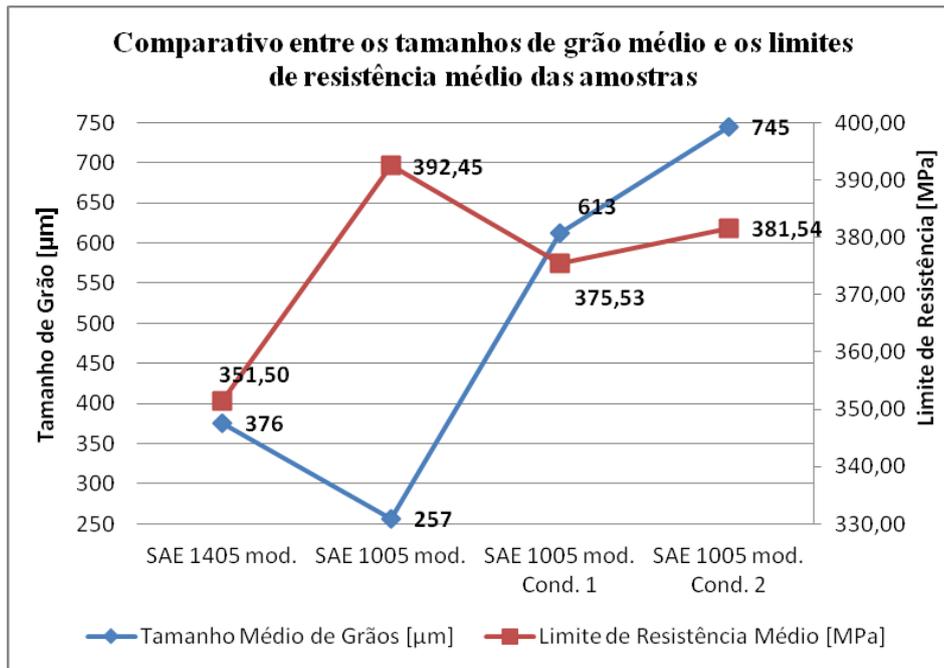


Figura 4.41 Comparativo entre os tamanhos de grão médio e os limites de resistência médio das amostras.

Na Tabela 4.10, podemos verificar que o resultado do tamanho de grão médio do FM 5,50mm produzido com o aço SAE 1405 modificado apresenta um desvio padrão muito próximo do valor da média. Isso ocorre devido à amostra de número 2 que apresentou tamanhos de grãos de diferentes escalas, devido ao tamanho de grão duplex. Nesse caso foi feita simplificação nos resultados e esse desvio padrão não implica em divergências para realizar a análise dos resultados.

Tabela 4.10 Médias e desvios do tamanho dos grãos dos materiais analisados.

Materiais	Tamanho Médio de Grãos [μm]	Desvio Padrão Médio do Tamanho de Grãos [μm]	Resultado Tamanho de Grãos Médios [μm]
SAE 1405 mod.	376	352	376 \pm 352
SAE 1005 mod.	257	159	257 \pm 159
SAE 1005 mod. Cond. 1	613	196	613 \pm 196
SAE 1005 mod. Cond. 2	745	205	745 \pm 205

Utilizando-se a Equação 4.1 para estimativa do limite de resistência em MPa estimado pelo percentual de Mn e Si, quantidade percentual de perlita (pelo diagrama ferro-carbono) e tamanho de grão medido, podemos verificar que seria possível obter os resultados esperados de diminuição do limite de resistência nos experimentos com o aço SAE 1005 modificado em suas três condições de produção, conforme Tabela 4.11. Porém, não foi possível garantir a diminuição do limite de resistência para a condição experimental 2.

$$\sigma_R = 15,4 \cdot \left[19,1 + 1,8 \cdot (\% Mn) + 5,4 \cdot (\% Si) + 0,25 \cdot (Perlita) + 0,5 \cdot d^{-1/2} \right] \text{ Equação 4.1}$$

Tabela 4.11 Tabela comparativa dos percentuais de C, Mn, Si, quantidade % de perlita, tamanho de grão, e limites de resistência calculados e medidos.

	Amostra	% C	% Mn	% Si	% Perlita	Tamanho de Grão (mm)	σ_R Calculado (MPa)	σ_R Medido (MPa)
SAE 1405 mod.	1	0,04	0,33	0,09	0,02	0,00199	483,5	357,4
	2	0,04	0,34	0,07	0,02	0,00728	399,7	346,8
	3	0,05	0,33	0,08	0,04	0,00200	482,3	350,2
	Média	0,04	0,33	0,08	0,03	0,00376	435,7	351,5
SAE 1005 mod.	4	0,04	0,51	0,16	0,02	0,00311	459,7	386,4
	5	0,05	0,40	0,13	0,04	0,00195	490,6	395,9
	6	0,06	0,46	0,15	0,05	0,00267	468,6	395,0
	Média	0,05	0,46	0,15	0,04	0,00258	470,8	392,4
SAE 1005 mod.-Cond. 1	7	0,04	0,47	0,17	0,02	0,00809	407,0	372,5
	8	0,04	0,47	0,17	0,02	0,00767	409,3	373,2
	9	0,04	0,47	0,17	0,02	0,00261	472,1	380,8
	Média	0,04	0,47	0,17	0,02	0,00612	419,8	375,5
SAE 1005 mod.-Cond. 2	10	0,04	0,51	0,17	0,04	0,00895	403,9	390,7
	11	0,04	0,51	0,17	0,04	0,00624	420,0	378,2
	12	0,04	0,51	0,17	0,04	0,00716	413,5	375,7
	Média	0,04	0,51	0,17	0,04	0,00745	411,8	381,5

A análise anterior feita considerando os percentuais de Mn e Si, nos permite dizer que teoricamente a variação desses elementos nas amostras avaliadas não é o fator gerador da diferença encontrada na condição experimental 2. Pelo contrário, pela equação da estimativa do limite de resistência, vemos que os resultados medidos correspondem ao esperado pelo aumento do tamanho dos grãos.

A avaliação da composição química das amostras de todos os experimentos nos permite avaliar, através da Tabela 4.11, as possíveis variações em suas propriedades mecânicas devido ao efeito dos elementos de liga presentes. De todos os elementos presente os que apresentaram diferenças mais significativas são o Mn e Si, de forma que já foram avaliados pela Equação 4.1. Os demais componentes possuem variações pequenas nas suas composições, o que não permite realizar inferências a respeito das suas influências nas propriedades mecânicas dos materiais analisados.

Tabela 4.12 Comparação das composições químicas das amostras (% em peso).

	Amostra	C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo	Sn	Nb	V
SAE 1405 mod.	1	0,04	0,33	0,09	0,008	0,013	0,020	0,013	0,018	<0,001	0,003	0,001	<0,001
	2	0,04	0,34	0,07	0,006	0,017	0,017	0,001	0,010	<0,001	0,003	0,001	<0,001
	3	0,05	0,33	0,08	0,009	0,014	0,015	0,006	0,010	<0,001	0,003	0,001	<0,001
SAE 1005 mod.	4	0,04	0,51	0,16	0,012	0,028	0,032	0,016	<0,001	<0,001	0,003	<0,001	<0,001
	5	0,05	0,40	0,13	0,011	0,021	0,023	0,008	<0,001	<0,001	0,004	<0,001	<0,001
	6	0,06	0,46	0,15	0,011	0,031	0,025	0,019	<0,001	<0,001	0,003	<0,001	<0,001
SAE 1005 mod. – Cond. 1	7	0,04	0,47	0,17	0,018	0,026	0,034	0,015	0,010	0,006	0,002	0,003	0,001
	8	0,04	0,47	0,17	0,018	0,026	0,034	0,015	0,010	0,006	0,002	0,003	0,001
	9	0,04	0,47	0,17	0,018	0,026	0,034	0,015	0,010	0,006	0,002	0,003	0,001
SAE 1005 mod. – Cond. 2	10	0,04	0,51	0,17	0,017	0,027	0,044	0,009	0,008	0,002	0,003	0,003	0,001
	11	0,04	0,51	0,17	0,017	0,027	0,044	0,009	0,008	0,002	0,003	0,003	0,001
	12	0,04	0,51	0,17	0,017	0,027	0,044	0,009	0,008	0,002	0,003	0,003	0,001

4.7. Resumo dos Resultados

Para a primeira parte do experimento, onde o objetivo determinado inicialmente foi o de caracterização dos fio-máquinas 5,50mm produzidos com os aços SAE 1405 e SAE 1005 modificados foi possível verificar que ambos os materiais apresentaram estruturas heterogêneas com grãos de ferrita e perlita, porém o tamanho dos grãos das amostras do FM 5,50mm produzidos com aço SAE 1005 modificado são, em média, 31,5% menores. Nesse caso, é válido o princípio das técnicas de endurecimento em metais, pois quanto menor o tamanho dos grãos, maior o número de contornos de grãos, criando maior dificuldade para as discordâncias se movimentarem e, por consequência, aumentando a resistência do material.

Foi constatada uma diferença de aproximadamente 50MPa a mais no limite de resistência do FM 5,50mm produzido com o aço SAE 1005 modificado em relação ao produzido com o aço SAE 1405 modificado. Para o caso do aço SAE 1005, como o material deverá passar pelo processo de trefilação, que provocará o encruamento e consequente aumento na resistência, mesmo que venha a sofrer o recozimento posterior, o limite de resistência final dos arames recozidos ficará muito próximo do limite praticado no mercado. Dessa forma, qualquer variação no processo de laminação ou na composição química do aço, pode gerar uma variação não desejada no que se refere ao limite de resistência.

Na avaliação da condição de fabricação do FM 5,50mm com aço SAE 1005 modificado, a relação inversa entre o limite de resistência e a temperatura de formação das espiras, indica que deve ser aprofundado o estudo em relação à variável temperatura de formação das espiras visto que pode proporcionar uma redução no limite de resistência, mesmo que ainda não garantida à obtenção de resultados significativos.

Foi identificada uma redução de 26,8% na espessura do filme de óxidos formados no FM 5,50mm com aço SAE 1005 modificado em relação ao FM 5,50mm produzido com aço SAE 1405 modificado. A camada menos espessa pode gerar problemas no processo de decapagem mecânica utilizado no processo de trefilação, porém também deve ser avaliada melhor a sua importância, com estudo dedicado ao uso do material na trefilação.

Para a condição experimental 1, onde foi testada a variação do resfriamento com 50% de água nas zonas de resfriamento, o material também apresentou uma estrutura heterogênea com grãos de ferrita e perlita, porém foi constatado que o tamanho dos grãos das amostras do experimento estavam em média 138% maiores do que o FM 5,50 produzido com o aço SAE 1005 modificado na condição padrão. Esse aumento no tamanho dos grãos provocou uma redução no limite de resistência do material de aproximadamente 4%, chegando a um valor médio de $375,5 \pm 4,3$ MPa.

Considerando que as práticas de mercado indicam que o limite de resistência dos arames recozidos gira em torno de 400 MPa, é mais seguro utilizar o FM da condição experimental 1 do que o mesmo na sua condição padrão de fabricação. Vale ressaltar que não foram feitos testes com a utilização dos fio-máquinas no processo de trefilação, a fim de validar as etapas de decapagem mecânica e posterior recozimento. Mesmo assim, já temos uma constatação de que é possível obter um material com essa composição química e um limite de resistência menor, para que sejam atendidas as necessidades do mercado e também atenda a questões de custo de fabricação.

Na condição experimental 1, também foi avaliada a espessura do filme de óxidos que ficou 33% maior do que a condição padrão do FM 5,50mm com o aço SAE 1005 modificado. De fato, ficou praticamente igual a do FM 5,50mm produzido com o aço SAE 1405 modificado. Isso pode indicar uma boa trabalhabilidade desse material na etapa de decapagem mecânica do processo de trefilação.

Para a condição experimental 2, com a produção do FM 5,50mm com o aço SAE 1005 modificado com 0% de água nas zonas de resfriamento, o material também apresentou uma estrutura heterogênea com grãos de ferrita e perlita, porém foi constatado que o tamanho dos grãos das amostras do experimento estavam em média 189% maiores do que o FM 5,50 produzido com o aço SAE 1005 modificado na condição padrão. Esse aumento no tamanho dos grãos provocou uma redução no limite de resistência do material de aproximadamente 3%, chegando a um valor médio de $381,5 \pm 5,3$ MPa.

Mesmo que a condição experimental 2 tenha obtido um valor de limite de resistência inferior ao da condição padrão, esse resultado foi superior ao limite de resistência da condição experimental 1. Isso frustra um pouco a expectativa de se obter

uma melhora no resultado com o aumento da temperatura da formação das espiras. O tamanho dos grãos seguiu o esperado, porém o limite de resistência não.

Da mesma forma que já comentado anteriormente, a utilização do material da condição experimental 2 é mais apropriada do que o material produzido na condição padrão, porém não foram aprofundados os testes desse material no processo de trefilação, ficando restrita a análise somente para a variação do limite de resistência e efeitos sobre tamanho de grãos e espessura da camada de óxidos.

Na condição experimental 2, também foi avaliada a espessura do filme de óxidos que ficou 15% maior do que a condição padrão do FM 5,50mm com o aço SAE 1005 modificado.

Foi feita avaliação do limite de resistência estimado considerando os percentuais de Mn e Si, o percentual de perlita e o tamanho de grão, e os resultados calculados correspondem à expectativa de diminuição do limite de resistência na medida em que o tamanho de grão foi aumentando. Porém, não foi possível obter na prática, através dos resultados medidos, a mesma relação de diminuição do limite de resistência.

A diferença ocorrida nos resultados da condição experimental 2 pode ser atribuída ao fenômeno de envelhecimento, porém esse efeito não foi levado em consideração nesse estudo já que as amostras foram testadas no período de até 10 dias após a sua produção.

5. CONCLUSÕES

- Os resultados experimentais da parte inicial para caracterização dos fio-máquinas 5,50mm produzidos com os aços SAE 1405 e SAE 1005 modificados, indicaram não ser possível a substituição imediata do aço SAE 1405 mod. pelo aço SAE 1005 mod. Mesmo que o limite de resistência de ambos os materiais esteja dentro do especificado pela norma, as práticas atuais de mercado requerem que o material possua um limite de resistência menor, fato não obtido pelo fio-máquina produzido com o aço SAE 1005 modificado.

- A temperatura da formação das espiras é uma variável que tem influência no limite de resistência dos materiais laminados, pois na maioria dos testes mostrou relação inversa.

- O experimento com 50% de água nas zonas de resfriamento demonstrou ser válido o princípio do mecanismo de endurecimento em metais pelo refino de grão com a diminuição do limite de resistência do fio-máquina 5,50mm pelo aumento do tamanho de grão.

- O experimento com 0% de água nas zonas de resfriamento também demonstrou ser válido o princípio do mecanismo de endurecimento em metais pelo refino de grão com a diminuição de resistência do fio-máquina 5,50mm pelo aumento do tamanho de grão, porém em proporção menor do que o esperado, visto que a temperatura na formação das espiras foi maior.

- Os resultados das duas condições experimentais utilizadas nesse trabalho indicaram não ser adequada a utilização do fio-máquina 5,50mm produzido com aço SAE 1005 modificado, tanto nas condições padrão de fabricação, quanto nas condições experimentadas. O fato principal é que ainda faltam análises para garantir que os efeitos dessas alterações não venham a provocar resultados indesejáveis na fabricação dos arames recozidos no processo de trefilação.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho pode trazer mais resultados com o complemento através da realização de trabalhos visando os seguintes pontos:

- Avaliação do uso do FM 5,50mm com o aço SAE 1005 modificado após a trefilação para a fabricação de arames recozidos em função da espessura da carepa e a etapa de decapagem mecânica existente no processo de trefilação.
- Avaliação do uso do FM 5,50mm com o aço SAE 1005 modificado na condição experimental 1 após a trefilação para a fabricação de arames recozidos em função da espessura da carepa e a etapa de decapagem mecânica existente no processo de trefilação.
- Avaliação das alterações nas propriedades mecânicas do FM 5,50mm com o aço SAE 1005 modificado nas condições experimentais 1 e 2, em períodos diversos de dias após a sua fabricação, para avaliar o efeito do envelhecimento.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5589**: Arames de baixo teor de carbono. Diâmetros, tolerâncias e pesos. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 87**: Aço carbono e ligados para construção mecânica, designação e composição química. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6892**: Materiais metálicos. Ensaio de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2002.

BHATTACHARYA, R. et al. **Influence of cooling rate on the structure and formation of oxide scale in low carbon steel wire rods during hot rolling**. Surface & Coatings Technology 201, p. 526-532, 2006.

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. 7. ed. New York. John Wiley & Sons, 2007.

Catálogo Construção Civil Gerdau. GERDAU. <<http://www.gerdau.com.br/produtos-e-servicos/produtos-por-aplicacao-detalhe-produto.aspx?familia=207>> Acesso em 10 Set. 2011.

CETLIN, P. R. **Módulos de Treinamento em Trefilação**. Sapucaia do Sul, 1999.

CHATTOPADHYAY, A. et al. **Study on formation of “easy to remove oxide scale” during mechanical descaling of high carbon wire rods**. Surface & Coatings Technology 203, p. 2912-2915, 2009.

CHEN, R. Y., YUEN, W. Y. D. **A study of the scale structure of hot-rolled steel strip by simulated coiling and cooling**. Oxidation of Metals, Vol. 53, nº 5/6, 2000.

CODA, R. C. **Laminação: Produtos Longos de Aço Laminados a Quente**. Laboratório de Transformação Mecânica. UFRGS, 2007.

DA SILVA, Fabiana L. **Melhoria da qualidade superficial em barras laminadas**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais – PPGE3M: UFRGS, 2010.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. 3. ed. Singapore. McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, 1988.

EL-BITAR, T. et al. **Effect of cooling rate after controlled forging on properties of low carbon multi-microalloyed steels.** Materials Science and Engineering A 534, p. 514-520, 2012.

GALDAMEZ, Edwin V. C. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos: USP, 2002.

GERDAU. **Apostila LAM 000 – Introdução e Conceitos de Laminação.** 2002.

GERDAU. **Apostila LAM 010 – Forno de Reaquecimento.** 2001.

GERDAU. **Apostila TRE 001 – Introdução e Conceitos de Trefilação.** 2007.

GERDAU. **Apostila TRE 008 – Preparação Superficial.** 2007.

GERDAU. **Matriz Posicionamento.** 2011.

GERDAU. **Processo de Produção do Aço.** <<http://www.gerdau.com/swf/pt-BR/processo-de-producao-do-aco/processo-de-producao-do-aco-conheca.aspx>> Acesso em 15 Set. 2011.

GHOSH, A. et al. **Effect of cooling rate on structure and properties of an ultra-low carbon HSLA-100 grade steel.** Materials Characterization 56, p. 59-65, 2006.

JURAN, J. M. et al. **Juran's Quality Handbook.** 5. ed. New York. McGraw-Hill Book Company, 1999.

KALIL, Sandro Aurélio P. **Desenvolvimento do arame galvanizado BWG 18 para aplicação na fabricação de telas.** Dissertação (Mestrado em Siderurgia). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais – PPGE3M: UFRGS, 2009.

KAZEMINEZHAD, M. TAHERI, A. K. **The effect of controlled cooling after rolling on the mechanical properties of a commercial high carbon steel wire rod.** Materials and Design 24, p.415-421, 2003.

KORCZAK, P. **Influence of controlled rolling condition on microstructure and mechanical properties of low carbon micro-alloyed steels.** Journal of Materials Processing Technology 157-158, p. 553-556, 2004.

LEE, K. M., LEE, H. C. **Grain refinement and mechanical properties of asymmetrically rolled low carbon steel.** Journal of Materials Processing Technology 210, p. 1574-1579, 2010.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments.** 7. ed. Hoboken, N. J.: John Wiley & Sons, 2009.

SCHERRER, Cristina M. **A indústria siderúrgica brasileira: um estudo econômico.** Dissertação (Mestrado em Economia). Programa de Pós Graduação em Economia da Faculdade de Ciência Econômicas: UFRGS, 2006.

SUN, W. et al. **High temperature oxide scale characteristics of low carbon steel in hot rolling.** Journal of Materials Processing Technology 155-156, p. 1307-1312, 2004.

TEOH, L. L. **Thermo-mechanical processing and microstructure of microalloyed steel bar and wire rod products.** Journal of Materials Processing Technology 48, p. 475-481, 1995.

ZAKY, A. I. et al. **Effect of different cooling rates on thermomechanically processed high-strength rebar steel.** Journal of Materials Processing Technology 209, p. 1565-1569, 2009.

WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. **Planejamento e análise de experimentos: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo.** Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1996.