

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

"Desenvolvimento de fio máquina para a fabricação
de arames para soldagem MIG com características
adequadas ao processo de descarepação mecânica"

Autora: Daniella de Sousa Cunha
Orientador: Professor Dagoberto Brandão Santos
Maio/2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Daniella de Sousa Cunha

**DESENVOLVIMENTO DE FIO MÁQUINA PARA A FABRICAÇÃO DE ARAMES
PARA SOLDAGEM MIG, COM CARACTERÍSTICAS ADEQUADAS AO PROCESSO
DE DESCAREPAÇÃO MECÂNICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica
e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Metalurgia Física
Orientador: Professor Dagoberto Brandão Santos

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2007

AGRADECIMENTOS

A autora agradece:

À Gerdau Açominas peça viabilização deste trabalho.

Aos colegas de trabalho que colaboraram no acompanhamento dos testes, retirada e análise das amostras e discussão dos resultados obtidos.

Ao Professor Dagoberto pelo apoio e orientação.

SUMÁRIO

	Página
1 – INTRODUÇÃO	1
2 – OBJETIVO	2
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1 – Aciaria	3
3.2 – Laminação de fio máquina	6
3.2.1 – Qualidade de superfície	9
3.2.2 – Controle dimensional.....	10
3.2.3 – Propriedades mecânicas	10
3.2.4 – Microestrutura (fração volumétrica do constituinte MA)	11
3.2.5 – Carepa	13
3.3 – Trefilação do arame	23
4 – METODOLOGIA.....	26
4.1 – Laminação de fio máquina	26
4.2 – Ensaios	27
4.2.1 – Avaliação da quantidade de carepa e sua remoção	28
4.2.2 – Verificação das propriedades mecânicas do fio máquina	29
4.2.3 – Caracterização microestrutural.....	29
4.2.4 – Determinação dos constituintes presentes na carepa e sua proporção....	30
4.2.5 – Determinação da fração volumétrica do constituinte MA	31
5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1 – Grau de descarepação.....	32
5.2 – Quantificação da carepa total.....	33
5.3 – Tração (limite de resistência e estrição).....	34
5.4 – Caracterização microestrutural.....	36
5.5 – Determinação dos constituintes da carepa e sua proporção	36
5.6 – Fração volumétrica do constituinte MA.....	40
5.7 – Comportamento da carepa em função do tempo de permanência a temperaturas acima de 600°C.....	41
5.8 – Avaliação global	42
6– CONCLUSÕES	43
7– RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS.....	44
8– REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
9– DADOS BIOGRÁFICOS DA AUTORA.....	47

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 3.1: Fluxo de laminação de máquina.....	7
Figura 3.2: Esquema do leito de resfriamento (LCC).....	8
Figura 3.3: Micro rupturas nas regiões de ocorrência de martensita em um arame 0,9mm ⁽²⁾	12
Figura 3.4: Detalhe de ruptura ocorrida a partir de região com ocorrência de martensita em um arame de bitola 0,8mm ⁽²⁾	12
Figura 3.5: Trincas tipo Chevron na região central do arame devido à ocorrência de martensita em um arame de bitola 0,8mm ⁽²⁾	13
Figura 3.6: Distribuição das camadas de óxido na carepa ⁽³⁾	14
Figura 3.7: Influência da temperatura sobre a fração dos constituintes da carepa ^(3, 9)	15
Figura 3.8: Diagrama de fases do sistema Fe-O (Darken & Gurry) ⁽³⁾	17
Figura 3.9: Quarta camada de óxido presente no aço AWS ER70S 6 ⁽¹¹⁾	18
Figura 3.10: Aspecto irregular da interface óxido/aço ⁽¹¹⁾	19
Figura 3.11: Ocorrência de carepa azul.....	20
Figura 3.12: Corpo de prova após ensaio de tração - ocorrência de carepa azul.	20
Figura 3.13: Efeito da temperatura de entrada no leito e do tempo na espessura da carepa - adaptação ⁽¹⁴⁾	21
Figura 3.14: Efeito da temperatura de entrada no leito na adesão da carepa - adaptação ⁽¹⁴⁾	22
Figura 3.15: Efeito da temperatura de entrada no leito de resfriamento na adesão da carepa para um alongamento de (5%) - adaptação ⁽¹⁴⁾	22
Figura 3.16: Efeito da taxa de resfriamento na adesão da carepa - adaptação ⁽¹⁴⁾	23
Figura 3.17: Esquema da descarepação por dobramento reverso ⁽³⁾	24
Figura 4.1: Porcentagem de oxigênio calculado x medido através do MEV.....	30
Figura 5.2: Quantidade de carepa x TLH.....	33
Figura 5.3: Variação do limite de resistência em função da temperatura de entrada no leito de resfriamento.....	34
Figura 5.4: Variação da estrição em função da temperatura de entrada no leito de resfriamento	35
Figura 5.5: Presença de faialita na carepa (MEV).	36
Figura 5.6: Análise qualitativa da interface aço/carepa (faialita).	37
Figura 5.7: Porcentagem de oxigênio das camadas da carepa.	37

Figura 5.8: Espessura dos constituintes x TLH.....	38
Figura 5.9: Proporção entre os constituintes x TLH.	39
Figura 5.10: Variação da fração volumétrica do constituinte MA em função da temperatura de entrada no leito de resfriamento.	40
Figura 5.11: Variação da espessura da carepa em função do tempo de permanência do fio máquina a temperaturas acima de 600°.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela III. 1: Especificação de composição química para o aço AWS ER 70S-6 (Norma ANSI/AWS A 5.18-79)	3
Tabela IV. 1: Temperaturas para entrada no leito de resfriamento.	27
Tabela IV. 2: Parâmetros propostos para o leito de resfriamento, após fixada a temperatura de entrada do material.....	27
Tabela V. 1: Resultados obtidos para as diferentes condições de resfriamento avaliadas.	42

RESUMO

O aço AWS ER70S 6, utilizado na fabricação de eletrodos para soldagem MIG, apresenta carepa bastante aderente, devido ao seu alto teor de Si.

Outro ponto a ser considerado diz respeito ao teor de P. O seu controle permite a produção de um aço com menor segregação central de Mn e Si que, aliado às condições adequadas de resfriamento, proporciona ao fio máquina as características necessárias à aplicação. Além de favorecer a segregação, o P também atua como um endurecedor do aço, aumentando as chances de haver quebras durante a trefilação do arame, especialmente em bitolas abaixo de 1 mm.

Além da composição química, outros fatores importantes que afetam a espessura e constituição das camadas de óxido presentes na carepa são a temperatura do fio máquina na entrada do leito de resfriamento e a subsequente taxa de redução da temperatura.

Neste trabalho foram testadas diferentes condições de resfriamento, visando obter a melhor condição possível para a formação de carepa com as características necessárias à descarepação mecânica, sem que houvesse prejuízo das características microestruturais e propriedades mecânicas do material

Para as condições avaliadas, não houve alterações significativas na microestrutura, em especial na fração volumétrica do constituinte MA, nem nas propriedades mecânicas do fio máquina.

Temperaturas mais altas de entrada no leito de resfriamento proporcionam a formação de uma camada de óxidos mais espessa, e com maior proporção de FeO que, combinada com o resfriamento lento geram uma proporção aproximada de 1:1 entre os constituintes FeO e Fe₃O₄.

Para o teste com diferentes taxas de resfriamento, a utilização da menor taxa (27 tampas fechadas) apresentou carepa 20% mais espessa, e uma maior descarepação média (+0,5%).

Considerando todos os parâmetros envolvidos, a melhor combinação avaliada foi o resfriamento com temperatura de entrada no leito de 870°C e tampas fechadas até o 14º módulo. Esta combinação de parâmetros gerou uma carepa mais espessa, devido ao maior tempo de permanência do fio máquina a altas temperaturas, que permitiu o crescimento da FeO e conseqüentemente uma remoção mais efetiva da carepa.

ABSTRACT

AWS ER70S 6 steel is used in MIG welding electrodes and presents a very adherent scale due to its high Si level.

Another point to be noted refers to P level. Its control allows the production of a steel with less Mn and Si segregation that, with appropriate cooling control gives to the wire rod the characteristics needed to the end use. Besides segregation, P raises the hardness of the steel, what may cause breakages during the drawing process, specially to sizes under 1mm.

Other important factors that affect the thickness and constituents of each scale oxide are wire rod temperature in the laying head and its cooling rate.

In this work were tested different cooling rates looking for the best scale condition for mechanical descaling, without damages to the required microstructure or to mechanical properties.

For the analyzed parameters, there were no significant changes in the microstructure, especially in the MA constituent volumetric faction or in mechanical properties of the wire rod.

Higher laying head temperatures allow the formation of a thicker scale layer and with more FeO that, associated to a slow cooling rate, giving the relation 1:1 among FeO and Fe₃O₄ constituents.

For the test using different cooling rates, the slower cooling (27 covers closed) showed a 20% thicker scale layer, and a bigger scale removal (+ 0,5%, in average).

Considering all involved parameters, the best association was a laying head temperature of 870°C and closed covers until the 27^a cover. They produced a thicker scale layer due to the longer time at high temperatures, what allowed the growing of FeO layer and the more effective scale removal.

1 – INTRODUÇÃO

O processo de soldagem MIG é baseado em um fluxo contínuo de alimentação de arame, protegido do contato com a atmosfera por uma nuvem de gás inerte.

A soldagem MIG é largamente utilizada na indústria mundial, e apresenta duas grandes vantagens em relação à soldagem com eletrodo revestido. A primeira diz respeito à produtividade, que é bem maior na utilização do processo MIG, por seu modo de alimentação contínua. Outra vantagem deste método de soldagem é a qualidade do cordão de solda. Como a proteção do fluxo é feita por uma nuvem de gás, não há geração de escória, que pode aderir ao aço.

O arame de aço para soldagem MIG, por seu alto teor de Si, apresenta carepa bastante aderente, o que dificulta sua remoção via descarepação mecânica. Para atender à aplicação, é necessário ajustar os parâmetros de resfriamento do fio máquina de modo a se obter uma carepa mais espessa, que seja mais facilmente removida, sem prejudicar as características microestruturais e propriedades mecânicas do material.

Adicionalmente à qualidade do fio máquina, é necessário também considerar as condições de inspeção. Deve-se procurar reduzir a temperatura das bobinas após a transformação de fases, de maneira a evitar a exposição desnecessária dos inspetores a temperaturas demasiadamente elevadas.

2 – OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da temperatura de formação das espiras e das condições de resfriamento da bobina nas características da carepa formada e na microestrutura do fio máquina, definindo a melhor condição para o processo de modo a produzir um fio máquina com características de carepa adequadas à descarepação mecânica e microestrutura compatível com a aplicação.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O fio máquina para fabricação de arames para solda MIG apresenta em sua composição química teores elevados de Mn e Si, conferindo um comportamento peculiar a este aço e sua carepa. Esses elementos conferem uma grande capacidade de desoxidação ao aço, e proporcionam ao cordão características mecânicas que permitem sua utilização em aplicações de responsabilidade, como a indústria automotiva.

No entanto, altos teores de Si induzem à formação da faialita, um óxido de Fe e Si, que gera uma carepa fina e aderente ao aço. Para que a remoção da carepa seja adequada, sem prejudicar as características microestruturais do aço, é necessário que se observem alguns pontos importantes durante sua fabricação.

3.1 – Aciaria

O aço utilizado para fazer eletrodos para solda MIG é o AWS ER 70S-6, que é um aço baixo carbono com elevados teores de Mn e Si. A tabela abaixo mostra sua composição química típica, expressa em %peso:

Tabela III. 1: Especificação de composição química para o aço AWS ER 70S-6 (Norma ANSI/AWS A 5.18-79)

Elemento	C	Mn	Si	P	S
Mínimo	0,07	1,40	0,80		
Máximo	0,15	1,85	1,15	0,025 Max	0,035 Max

A presença de Mn e Si em elevadas quantidades confere ao eletrodo uma boa desoxidação, proporcionando tenacidade à região soldada. Esta característica é especialmente importante quando se considera a utilização em larga escala deste tipo de soldagem na indústria automobilística, onde a falha de uma solda pode gerar graves consequências, incluindo perda de vidas.

Devido aos elevados teores de Mn e Si presentes no aço em questão, há uma grande tendência à ocorrência de segregação desses elementos na região central do tarugo. Essa tendência é agravada pela presença do P, por isso seu teor deve ser reduzido ao mínimo possível. Esta medida, aliada a uma prática de lingotamento adequada, contribui para minimizar a segregação desses elementos.

Como o Mn é gamagêneo (estabilizador da austenita), o aumento de sua concentração na região central do fio máquina gera um constituinte disperso na matriz. Este constituinte, que é menos dúctil que o restante do material, se transforma em martensita após sofrer deformação plástica e é comumente denominado “austenita retida”, em uma alusão à maior estabilidade da austenita na região, ou constituinte MA. A presença de um constituinte de maior dureza no interior do arame poderá gerar rupturas do tipo Chevron, reduzindo a produtividade do processo devido às repetidas interrupções para soldagem das extremidades rompidas. Na indústria, o constituinte MA é também designado pelo termo fase amarela, devido à sua cor observada ao microscópio metalográfico, após ser revelado pelo reativo Le Pera ⁽¹⁾.

Outro cuidado importante a ser observado na Aciaria relaciona-se à limpidez do aço. Como o arame é trefilado até bitolas abaixo de 1,00mm, é importante que o nível de inclusões seja controlado, para evitar quebras durante o processo de trefilação. Para assegurar um bom índice de limpidez no material, é preciso controlar alguns parâmetros como selagem do sistema, velocidade de lingotamento e características da escória. Deve-se evitar a presença de Al, pois a Al_2O_3 é a inclusão mais prejudicial ao processo, devido à sua elevada dureza, e conseqüente indeformabilidade.

Na Gerdau Açominas, o aço AWS ER 70 S6 é produzido de acordo com a seguinte rota:

- Desfosforação: quanto menor o teor de P, menor a segregação central de Mn, que leva à formação do constituinte MA, prejudicial ao processo de trefilação.
- Descarburação.

- Desoxidação: não pode ser feita com adição de Al, para evitar a formação de Al_2O_3 . A correção do C é feita através da desoxidação com carbureto de silício (SiC).
- Refino Secundário (Forno Panela): nesta etapa são feitos os ajustes finais na composição química, que é bastante restrita. Apesar de a norma permitir certa variação, o mercado é bastante exigente, e faz restrições além do normatizado. A variação do %C, por exemplo, é de apenas três pontos, ou seja, o visado $\pm 0,01\%$ (0,07 a 0,09%C). No Forno Panela, é utilizada uma escória sintética especial, com grande capacidade de captação de inclusões, para contribuir para a limpeza do produto.
- Lingotamento Contínuo de Tarugos: para manter baixo o nível de inclusões no aço, o lingotamento é feito com a utilização de válvulas submersas, protegendo assim o jato de aço líquido do contato com o oxigênio do ar. O tubo longo, que liga a panela ao distribuidor, recebe vedação com argônio no seu encaixe com a panela. O aço deve estar protegido do contato com a atmosfera durante todo o tempo em que estiver no estado líquido, por isso no distribuidor também é importante evitar essa interação, cobrindo toda a superfície com um isolante. Essa medida também auxilia na manutenção da temperatura, evitando quedas bruscas que podem prejudicar e até interromper o lingotamento. Outro importante ponto de controle nesta etapa são os parâmetros de produção (temperatura do aço, agitação eletromagnética, velocidade de lingotamento), que influenciarão na qualidade interna do produto final.
- Inspeção dos tarugos: para impedir que tarugos com eventuais defeitos de superfície sejam laminados e gerem fio máquina com qualidade de superfície inferior, os tarugos são inspecionados antes do enformamento.
- Laminação: os tarugos são laminados e as bobinas resfriadas lentamente para evitar a formação do constituinte MA e possibilitar a obtenção de uma carepa mais espessa, adequada à remoção por meios mecânicos (dobramento).

- Inspeção das bobinas: após a laminação, as bobinas são inspecionadas para verificação de defeitos de superfície e formação. Nesta etapa, são retiradas amostras para realização de ensaios mecânicos e metalográficos.

3.2 – Laminação de fio máquina

Na Gerdau Açominas, o tarugo de seção quadrada, com bitola inicial 160x160mm ou 180x180mm e aproximadamente 10500 mm de comprimento pode ser laminado para fio máquina entre 5,5 e 22,0mm. São geradas bobinas com aproximadamente 2,1t (tarugos com seção transversal de 160x160mm) ou 2,6t (tarugos com seção transversal de 180x180mm).

O forno de reaquecimento de tarugos é do tipo *walking beam*, cujo mecanismo de movimentação dos tarugos é através de vigas caminhantes, e não por empurramento, o que ajuda a preservar a qualidade de superfície do material, evitando marcas e arranhões decorrentes do atrito entre a soleira do forno e o aço.

O processo de laminação dos tarugos segue o fluxo mostrado na figura 3.1:

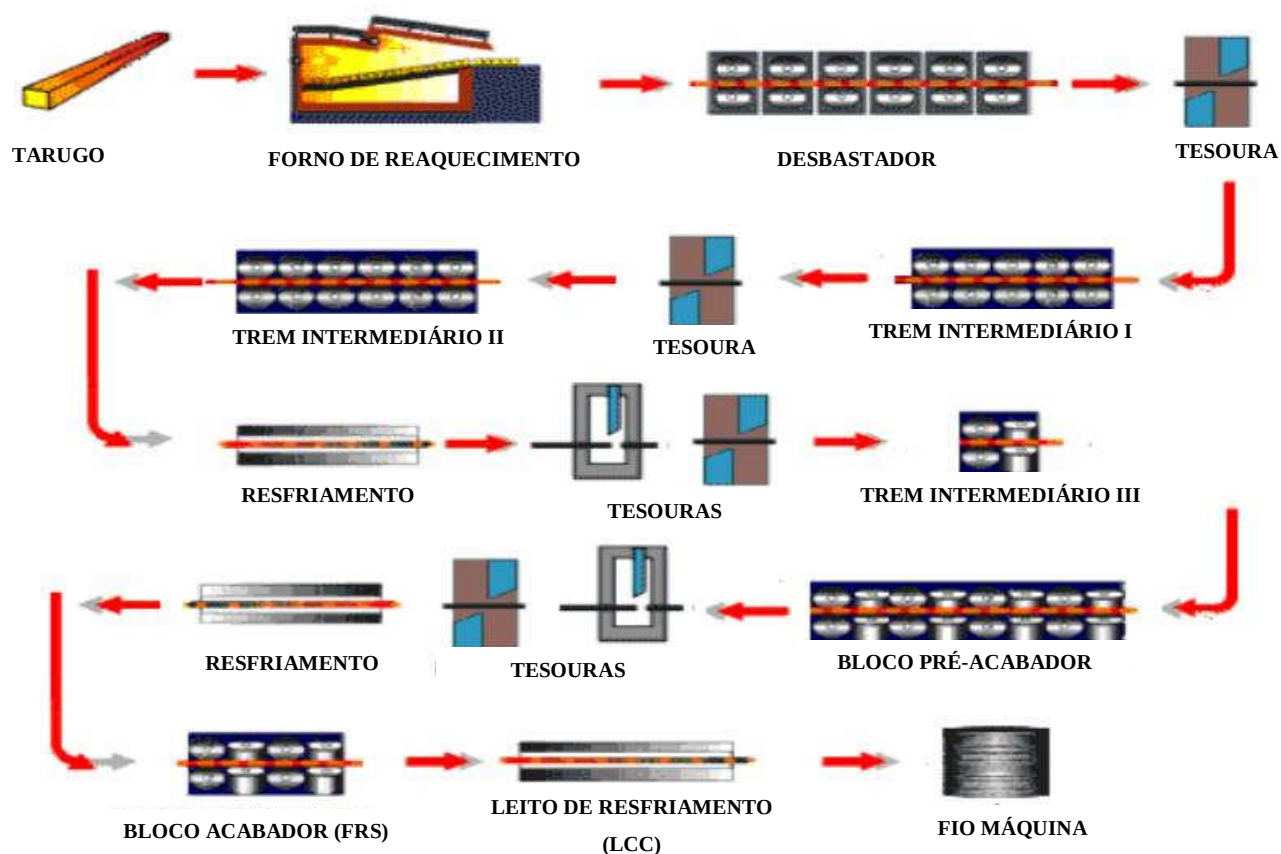


Figura 3.1: Fluxo de laminação de máquina

O fio máquina utilizado para a aplicação em questão tem 5,5 mm de diâmetro, e deve apresentar:

- Excelente qualidade de superfície.
- Bom controle dimensional.
- Propriedades mecânicas adequadas.
- Microestrutura controlada (quantidades mínimas de constituinte MA).
- Carepa para descarepação mecânica.

O laminador da Gerdau Açominas é bastante moderno, o que favorece a produção de fio máquina de qualidade para uma grande variedade de aplicações, desde aços baixo C para trefila fina até aços alto C e CHQ (Cold Heading Quality), para conformação a frio.

O leito de resfriamento possui 120m de comprimento, sendo 108m com tampas, e 63m com ventiladores, o que permite imprimir diferentes taxas de resfriamento às bobinas, dependendo da aplicação do aço e da microestrutura e propriedades mecânicas objetivadas após o resfriamento do fio máquina.

As principais dimensões do leito de resfriamento da Gerdau Açominas são mostradas no esquema da figura 3.2. Ele é composto por 12 mesas com 2 módulos em cada uma. Cada módulo tem 2 tampas, excetuando-se o primeiro. Nesta região localiza-se uma câmera de vídeo e 1 pirômetro, que permitem o monitoramento das espiras logo após a sua formação.

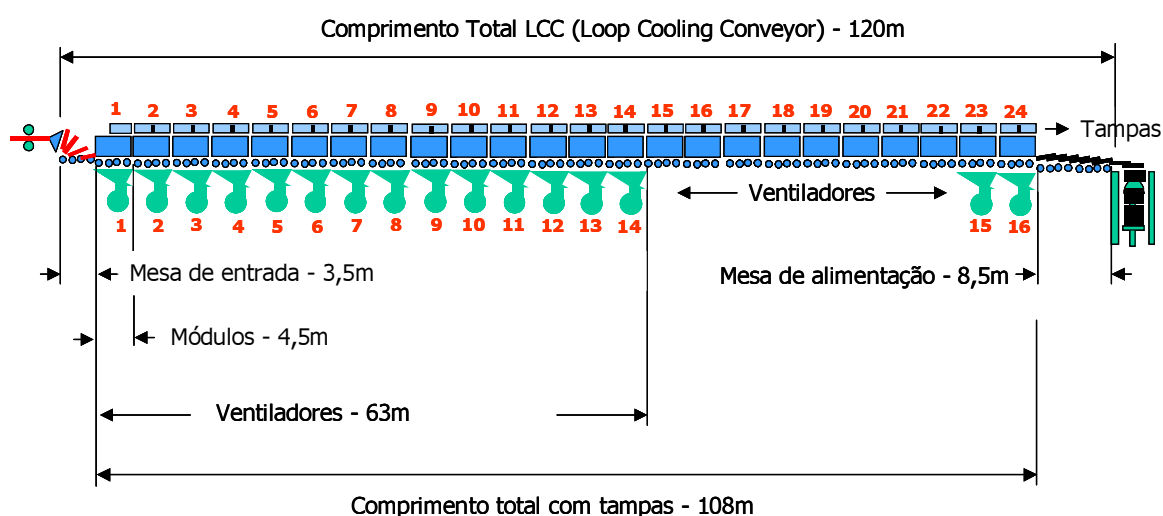


Figura 3.2: Esquema do leito de resfriamento (LCC).

Após a formação das espiras, o fio máquina cai na mesa de entrada, onde se inicia o resfriamento. Para se obter as características microestruturais e de carepa

necessárias à aplicação MIG, as tampas do leito são fechadas, diminuindo drasticamente a taxa de redução de temperatura.

A utilização das tampas fechadas é especialmente importante no início do leito. Como o fio máquina nesta região está em temperatura muito alta, da ordem de 900°C, sua taxa de resfriamento em condições normais (tampas abertas) seria muito elevada, aumentando a possibilidade de aumento da fração volumétrica do constituinte MA, e de formação de uma carepa com espessura insuficiente para ser removida por meios mecânicos.

As bobinas são movimentadas ao longo do leito de resfriamento através de rolos, que podem girar em diferentes velocidades, de acordo com as propriedades a serem obtidas no aço. No caso do MIG, a velocidade de deslocamento das bobinas é bastante reduzida, de maneira a aumentar o tempo de permanência do material nas regiões abafadas pelas tampas.

Além do posicionamento das tampas, também é possível aumentar a taxa de resfriamento utilizando-se os 14 ventiladores com função metalúrgica que o leito de resfriamento da Gerdau Aço Minas possui. Os ventiladores 15 e 16 têm como função resfriar mais rapidamente as bobinas, após finalizada a transformação das fases. Este recurso melhora as condições de inspeção e formação das bobinas, contribuindo para a produção de um fio máquina de alta qualidade. No entanto, quando é utilizada uma baixa taxa de resfriamento, é preciso estar atento à temperatura das espiras na região desses ventiladores, pois se ela ainda estiver muito elevada (próxima à temperatura de transformação do material), poderá haver transformação de fase, prejudicando a microestrutura e propriedades mecânicas do produto.

3.2.1 – Qualidade de superfície

Se o fio máquina apresentar defeitos em sua superfície, como esfoliações, escamas e dobras, podem ocorrer quebras, que diminuirão a produtividade do processo de trefilação. Mesmo quando os defeitos não são graves o suficiente para causar quebras, será gerado um arame com superfície irregular. Essas irregularidades impedem a limpeza eficiente do arame, levando restos de sabão e carepa para o

processo subsequente, prejudicando a qualidade do produto e a produtividade do processo.

O arame para soldagem MIG é revestido por uma fina camada de cobre eletrolítico, que não ficará uniforme se as condições de sua superfície não estiverem adequadas. Restos de sabão e carepa prejudicam a condução da corrente elétrica, gerando instabilidade durante a utilização do eletrodo na soldagem.

Para evitar as ocorrências acima, todos os tarugos para a laminação de fio máquina MIG são inspecionados, assim como as bobinas produzidas.

3.2.2 – Controle dimensional

As dimensões do fio máquina devem ser controladas (altura, largura e ovalização) para evitar que irregularidades em sua forma gerem atrito desnecessário junto às fieiras, acelerando seu desgaste ou criando a possibilidade de surgirem defeitos na superfície do arame. Na Gerdau Açominas é utilizado um medidor a laser em dois pontos da linha (uma medição intermediária, e outra após o último passe de laminação). Há ainda a aferição manual da bitola, na área de inspeção. Essas medidas garantem o fornecimento regular de fio máquina com dimensões dentro das necessidades dos clientes.

3.2.3 – Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas controladas para o fio máquina MIG são limite de resistência e estrição.

Limites de resistência muito altos provocam desgaste acentuado das fieiras e queda na ductilidade do fio máquina e, conseqüentemente, do arame. Em geral, os clientes solicitam que o limite de resistência se situe sempre abaixo de 530 MPa. Esse valor pode variar de acordo com a robustez do processo do cliente, e com a utilização ou não de tratamento térmico intermediário durante a trefilação.

Já o controle da estrição é importante devido às grandes reduções impostas ao material. Caso ele não tenha ductilidade suficiente para se deformar sem romper, fica inviável sua utilização, especialmente para bitolas abaixo de 1 mm. Como a grande maioria dos clientes não faz tratamento térmico intermediário, a exigência de estrição para o fio máquina fica em torno 80%, no mínimo.

3.2.4 – Microestrutura (fração volumétrica do constituinte MA)

O constituinte formado nas regiões onde há segregação de P, Mn e Si no fio máquina apresenta menor ductilidade que a matriz, o que faz com ele atue como concentrador de tensões durante a trefilação. Esta situação é agravada pelo surgimento de um estado de tensões devido à transformação induzida pela deformação plástica desse constituinte em martensita.

O estado de tensões criado no arame irá aumentar as chances de ocorrência de quebras, especialmente para bitolas menores que 1 mm. Isso ocorre porque durante a trefilação as regiões compostas por martensita não se deformam com o restante do material, provocando o surgimento de microrupturas que coalescem ao longo do processo, formando trincas do tipo Chevron e culminando na ruptura do arame, conforme evidenciado nas figuras 3.3 a 3.5.

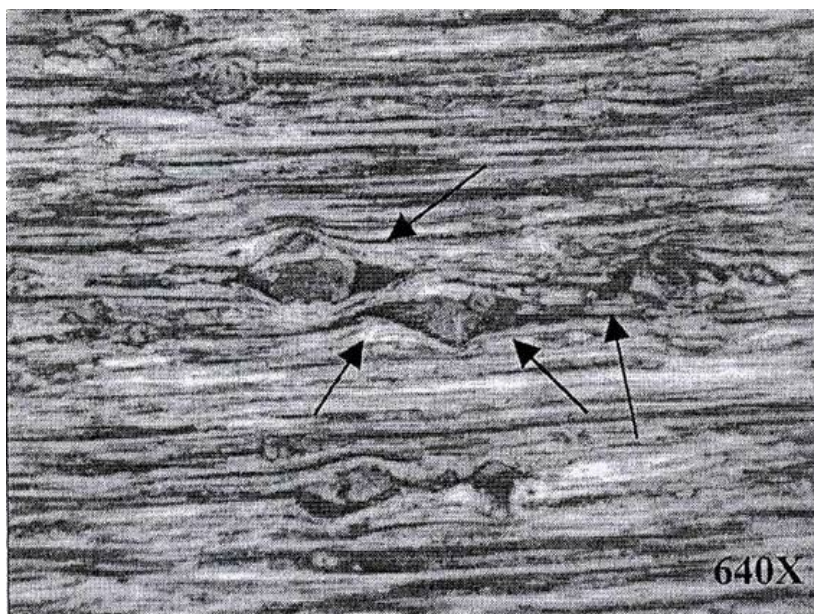


Figura 3.3: Micro rupturas nas regiões de ocorrência de martensita em um arame 0,9 mm ⁽²⁾

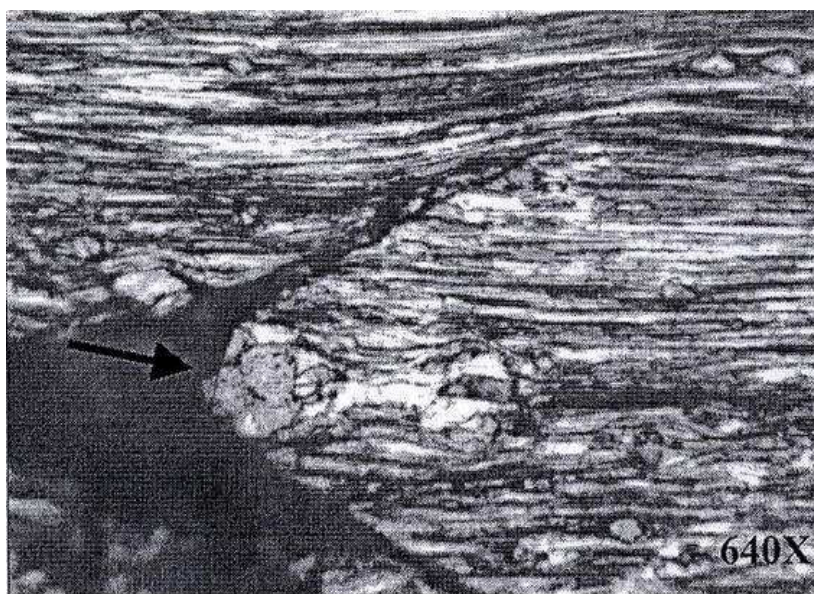


Figura 3.4: Detalhe de ruptura ocorrida a partir de região com ocorrência de martensita em um arame de bitola 0,8 mm ⁽²⁾.

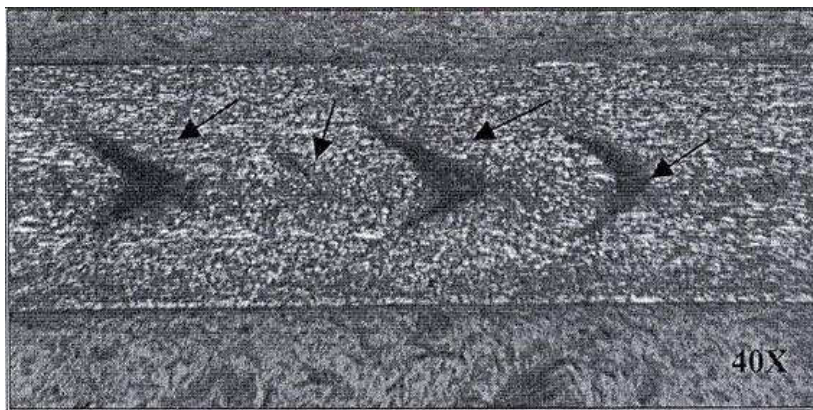


Figura 3.5: Trincas tipo Chevron na região central do arame devido à ocorrência de martensita em um arame de bitola 0,8mm ⁽²⁾.

Além da composição química e dos parâmetros de lingotamento, a taxa de resfriamento após a laminação do fio máquina também influencia na formação do constituinte MA. Taxas mais baixa de resfriamento levam a menores quantidades do constituinte MA, favorecendo então a qualidade interna do fio máquina, e sua trefilabilidade.

3.2.5 – Carepa

O principal aspecto abordado neste trabalho é a carepa do fio máquina. Carepa é uma camada de óxidos, que se forma a altas temperaturas e é produto da oxidação do aço em contato com o oxigênio presente no ar.

A figura 3.6 mostra as fases normalmente presentes na carepa, a partir da interface aço/óxido: wustita (FeO), magnetita (Fe_3O_4) e hematita (Fe_2O_3).

A proporção aproximada de cada fase, a temperaturas maiores que 700°C é de ⁽⁷⁾:

- 95% wustita (FeO);
- 4% magnetita (Fe_3O_4);
- 1% hematita (Fe_2O_3).

A temperaturas abaixo de 620°C, a Fe_3O_4 tem sua proporção em relação à FeO aumentada na carepa. Já a Fe_2O_3 se mantém em quantidades mínimas e praticamente constantes em qualquer faixa de temperatura. A FeO não é estável durante o resfriamento, e pode se transformar em Fe_3O_4 , dependendo da taxa de redução de temperatura aplicada ⁽⁸⁾.

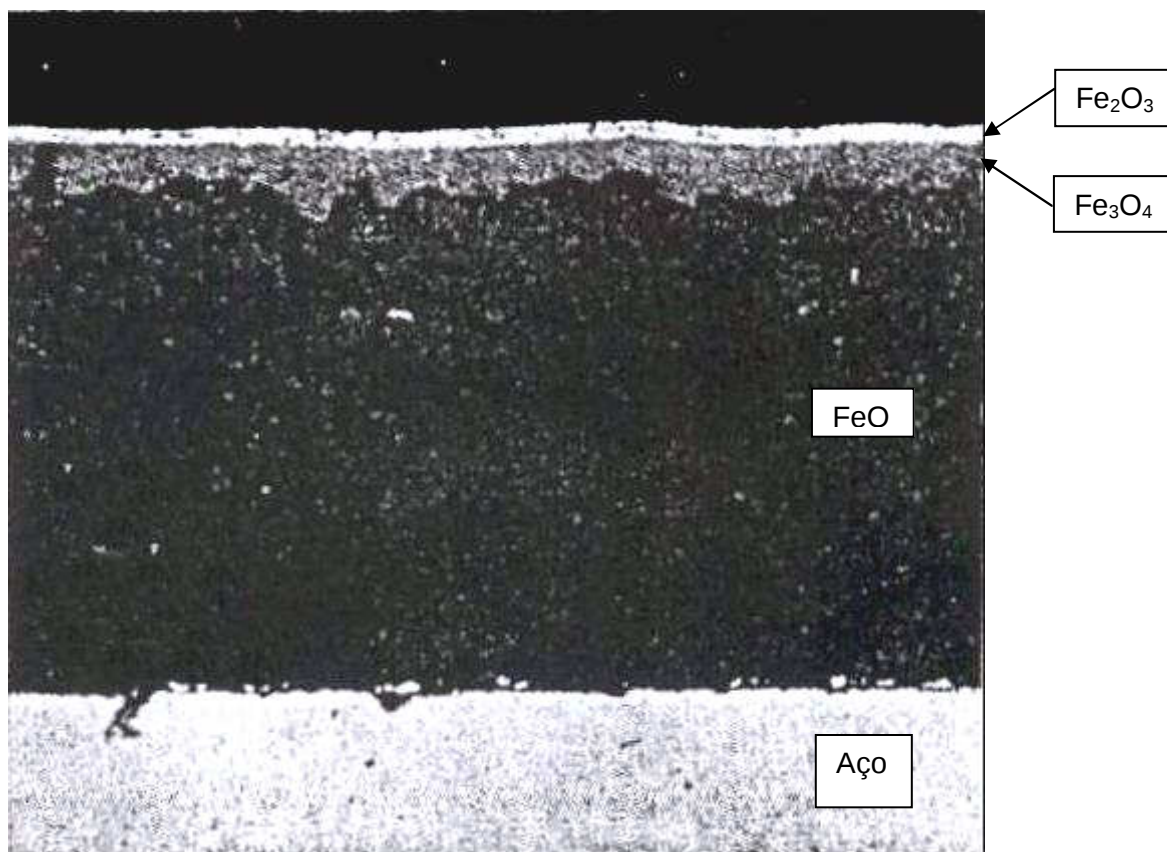


Figura 3.6: Distribuição das camadas de óxido na carepa ⁽³⁾

Devido ao resfriamento lento sofrido por este aço, a proporção de óxidos é bastante alterada, encontrando-se comumente a razão 1:1 para $\text{FeO}/(\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$. A camada de Fe_2O_3 continua sendo bastante delgada, o que dificulta sua medição.

A temperatura é um fator de suma importância na velocidade de crescimento e na constituição dos óxidos da carepa. Na figura 3.7, verifica-se a variação da proporção entre os constituintes em função da temperatura.

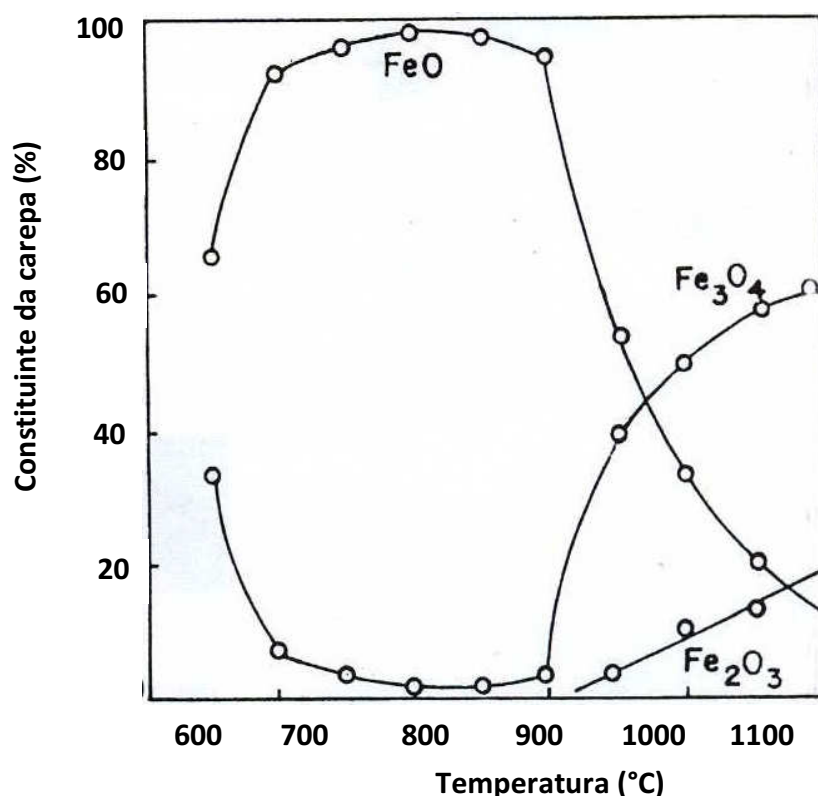


Figura 3.7: Influência da temperatura sobre a fração dos constituintes da carepa ^(3, 9).

A wustita exerce grande influência no grau de dificuldade de remoção da carepa. A FeO formada é sempre deficiente em Fe, o que gera de 5 a 16% de defeitos em sua estrutura, tornando-a a fase presente na carepa mais solúvel em ácidos⁽⁴⁾.

Por outro lado, a FeO é mais dúctil que a Fe₃O₄, o que poderia dificultar sua remoção pelo método de dobramento reverso (descarepação mecânica) ⁽⁵⁾.

No entanto, estudos mostram que quanto mais espessa é a camada de FeO, menos aderente é a carepa ao aço⁽³⁾. Este fato pode ser explicado pelo aumento das tensões internas durante o crescimento da carepa, quando fio máquina é mantido em altas temperaturas no início do resfriamento ⁽¹⁵⁾. Esse estado de tensões promove a formação de trincas na camada de óxidos, facilitando sua remoção por meios mecânicos.

A Fe_3O_4 é um óxido muito aderente ao aço, e sua presença durante o processo de trefilação, mesmo que em pequenas quantidades, é extremamente prejudicial, pois é um óxido bem mais duro que o aço. A Fe_3O_4 apresenta uma dureza média (HB) aproximadamente 2,5 vezes maior que a do aço para soldagem MIG, o que provoca desgaste prematuro e até mesmo ruptura da fieira.

Além de ser prejudicial à trefilação, a Fe_3O_4 , devido à sua grande aderência, pode continuar junto ao arame, gerando uma camada irregular no revestimento de cobre que irá dificultar a condução da corrente durante a soldagem, provocando instabilidade do arco elétrico. O cobre e os restos de óxido podem se acumular no bico de soldagem, culminando no entupimento do mesmo, com conseqüente interrupção do processo.

O crescimento camada de óxidos se dá por difusão de O_2 (início do crescimento, enquanto a camada ainda é bastante fina – crescimento linear) e Fe (restante do crescimento, cresce parabolicamente), como descrito nas equações ⁽⁶⁾ abaixo:

Crescimento linear:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{2N_{\text{O}_2}}{c_{\text{O}}}, \quad (3.1)$$

$$\text{sendo: } N_{\text{O}_2} = k \ln \left(\frac{1 - x_{\text{O}_2}^0}{1 - x_{\text{O}_2}^a} \right) \quad (3.2)$$

Onde:

N_{O_2} é a densidade molar do fluxo de O_2 ;

c_{O} é a densidade molar do oxigênio na FeO ;

$x_{\text{O}_2}^0$ e $x_{\text{O}_2}^a$ são as frações molares de oxigênio na atmosfera (21% para o ar) e na interface gás/óxido.

Crescimento parabólico:

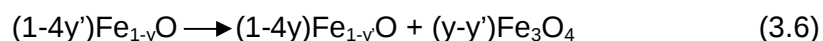
$$\frac{ds}{dt} = \frac{K_1}{2s}, \quad (3.3)$$

sendo $K_1 = 6,1 \exp\left(-\frac{20400}{T}\right)$, cm^2s^{-1} (3.4)

Durante o resfriamento, quando a temperatura se aproxima de 570°C, ocorre uma reação eutetóide, onde FeO se transforma em Fe₃O₄ (Fig. 3.8).



Como a precipitação do Fe não é comumente observada, foi proposta a seguinte reação ⁽⁵⁾:



Segundo Fischer, Hoffmann e Shimada e Shiroiwa e Matsuno, a maior taxa de decomposição da FeO ocorre a 400°C. Chaudron e Forestier registraram o ápice da reação a 470°C ⁽⁵⁾.

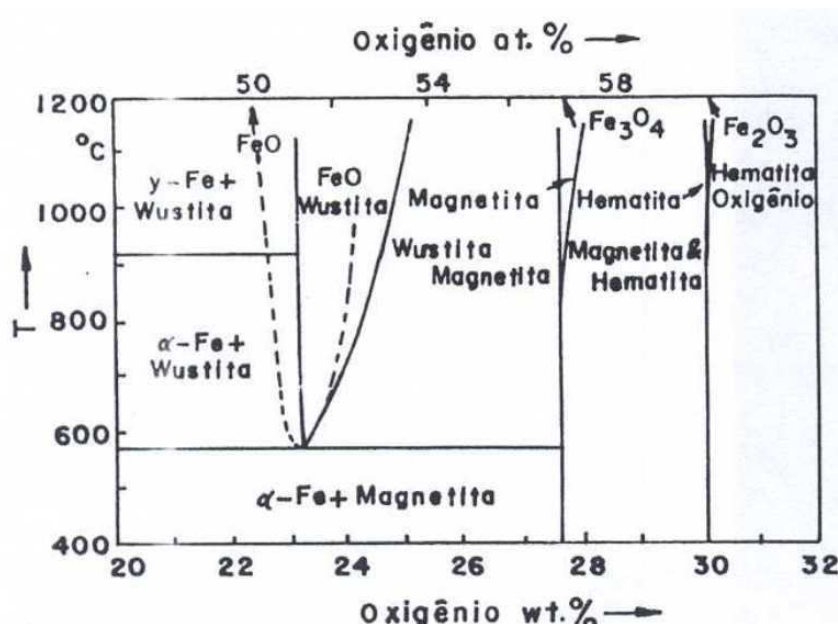


Figura 3.8: Diagrama de fases do sistema Fe-O (Darken & Gurry) ⁽³⁾.

Para aços contendo elevados teores de Si, uma fina camada de faialita se faz presente na interface aço/óxido ⁽¹⁰⁾.

No aço AWS ER70S 6, além das camadas de wustita, magnetita e hematita, se faz presente entre a carepa convencional e o aço uma camada de faialita, que é um óxido de ferro rico em Si (figura 3.9). Este óxido tem como característica marcante a aderência ao fio máquina. Esta fase provavelmente assume o papel de “barreira”, dificultando a difusão do Fe para a carepa, reduzindo assim sua cinética de crescimento. Daí a menor espessura de carepa, característica desse aço.

A inibição do crescimento da espessura da camada de óxidos se explica pela presença de microvazios entre a FeO e a Fe_2SiO_4 , que se tornam maiores à medida que o %Si aumenta. Essa barreira de microvazios inibe o crescimento da carepa. Esta afirmação é confirmada na prática, onde se observa que a espessura da camada de carepa do aço AWS ER70S 6 é menor que a de aços baixo C com baixo %Si submetidos ao mesmo padrão de resfriamento. A faialita produz ainda uma superfície irregular na interface aço/óxido, que explica sua “ancoragem” no substrato ⁽¹¹⁾, e pode ser observada na figura 3.10.

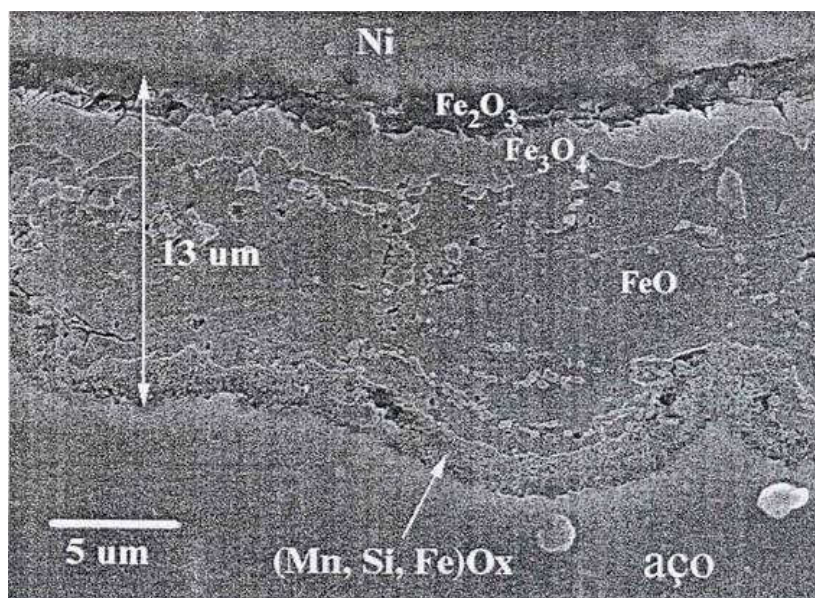


Figura 3.9: Quarta camada de óxido presente no aço AWS ER70S 6 ⁽¹¹⁾.

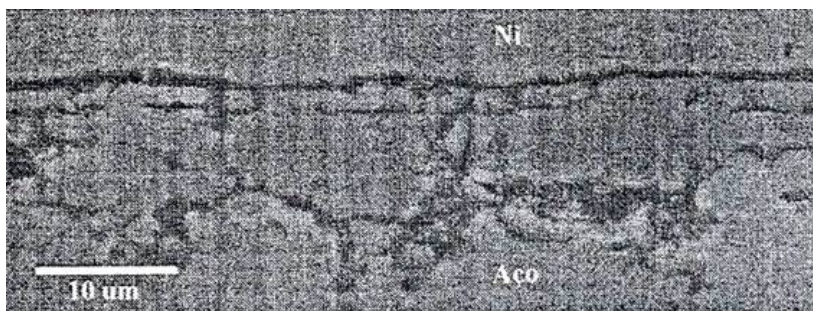


Figura 3.10: Aspecto irregular da interface óxido/aço ⁽¹¹⁾.

Uma explicação para o mecanismo de “ancoragem” da carepa de aços com alto teor de Si foi dada por Taniguchi *et alii* ⁽¹²⁾ e Fukagawa *et alii* ⁽¹⁹⁾. Quando um aço com alto Si é exposto a uma atmosfera oxidante a altas temperaturas, há a geração de uma fase líquida do eutético FeO-Fe₂SiO₄, que penetra tanto na carepa quanto no aço, prendendo-os firmemente, após sua solidificação.

Já Kizu, Nagataki, Inazumi e Hosoya ⁽¹³⁾ afirmam que a maior aderência da carepa de aços com alto %Si se deve à menor discrepância entre o parâmetro de rede da faialita em relação ao aço, quando comparado com a FeO/aço. Também confirmam a ocorrência de uma fase líquida, associando a presença de P no sistema Fe-O-Si à redução do ponto de fusão do óxido para 890°C, formando então o eutético composto por FeO, Fe₂SiO₄ e Fe₃(PO₄)₂. No entanto, citam essa fase líquida como um fator que favorece o desprendimento da carepa.

Juntamente com a composição química, outros fatores exercem influência na capacidade de descarepação de um aço ⁽¹⁴⁾:

- Temperatura na entrada do leito de resfriamento: o aumento da temperatura na entrada do leito de resfriamento favorece a remoção da carepa, conforme figura 3.13. No entanto, deve-se observar um limite para essa elevação de temperatura (figuras 3.14 e 3.15), de modo a não provocar o colapso da carepa através da formação de bolhas devido à alta temperatura (*blistering* – figura 3.11). Essas bolhas tendem a se romper, expondo novamente o aço à oxidação. A carepa gerada nessa condição é extremamente aderente ao aço, pois a temperatura nesse momento se encontra na faixa de formação da

Fe_3O_4 . Ela apresenta a cor azul, e, não pode ser completamente removida na descarepação. Mesmo após a realização de ensaio de tração, com rompimento do corpo de prova, essa carepa ainda se mantém aderida ao aço, em diversos pontos, conforme pode ser observado na figura 3.12.

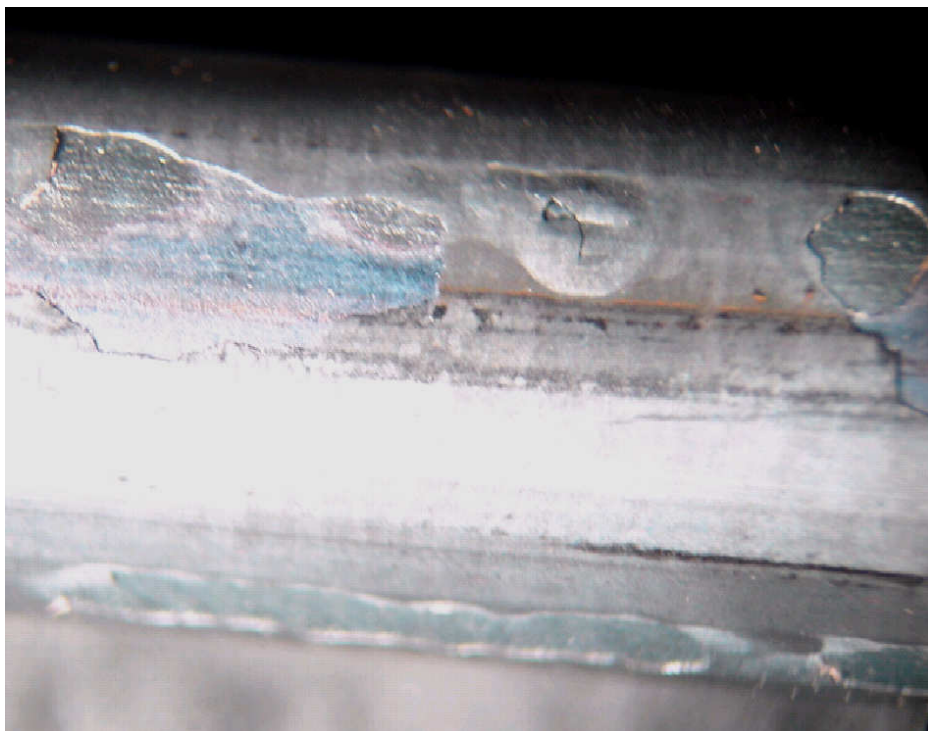


Figura 3.11: Ocorrência de carepa azul.



Figura 3.12: Corpo de prova após ensaio de tração - ocorrência de carepa azul.

- Taxa de resfriamento: a redução na taxa de resfriamento tende a facilitar a remoção da carepa (figura 3.16), pois um maior tempo a altas temperaturas permite o crescimento da carepa, favorecendo um aumento na espessura da camada de FeO. No entanto, para temperaturas entre 570 e 300°C deve haver um aumento na taxa de resfriamento, a fim de se evitar a decomposição da FeO em Fe₃O₄ (e precipitação da Fe₃O₄ na interface metal/carepa), que reduziria as tensões internas, dificultando a descarepação ^(15,22).

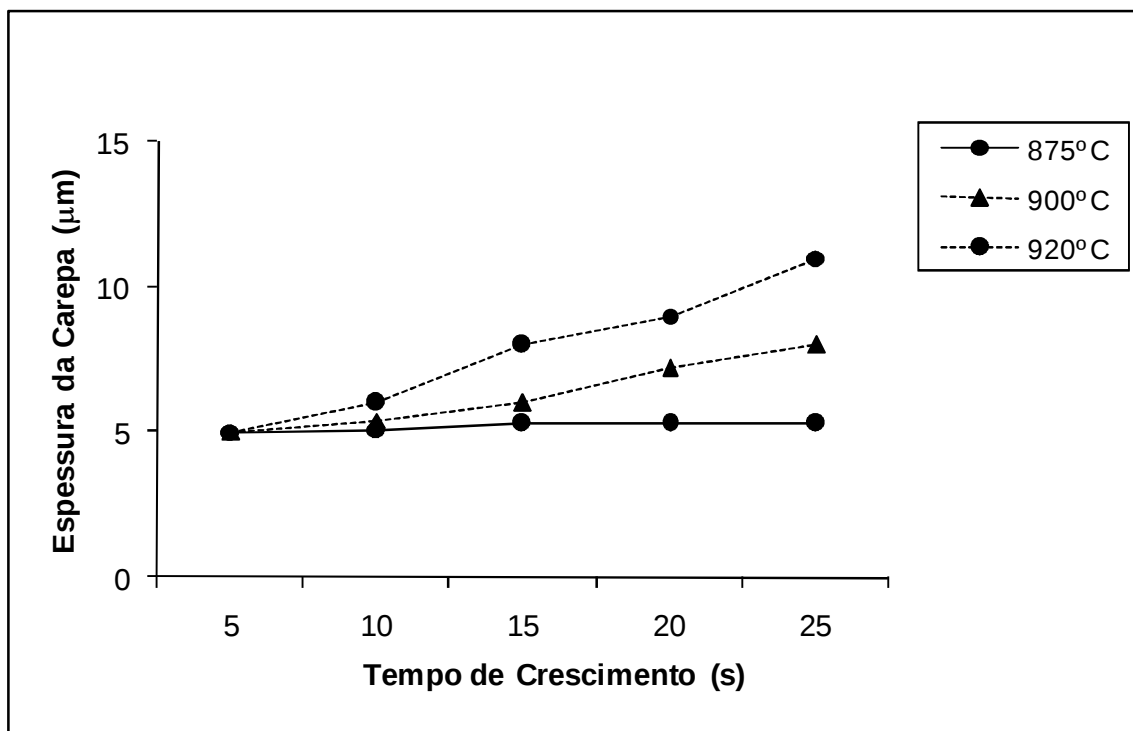


Figura 3.13: Efeito da temperatura de entrada no leito e do tempo na espessura da carepa – adaptação ⁽¹⁴⁾.

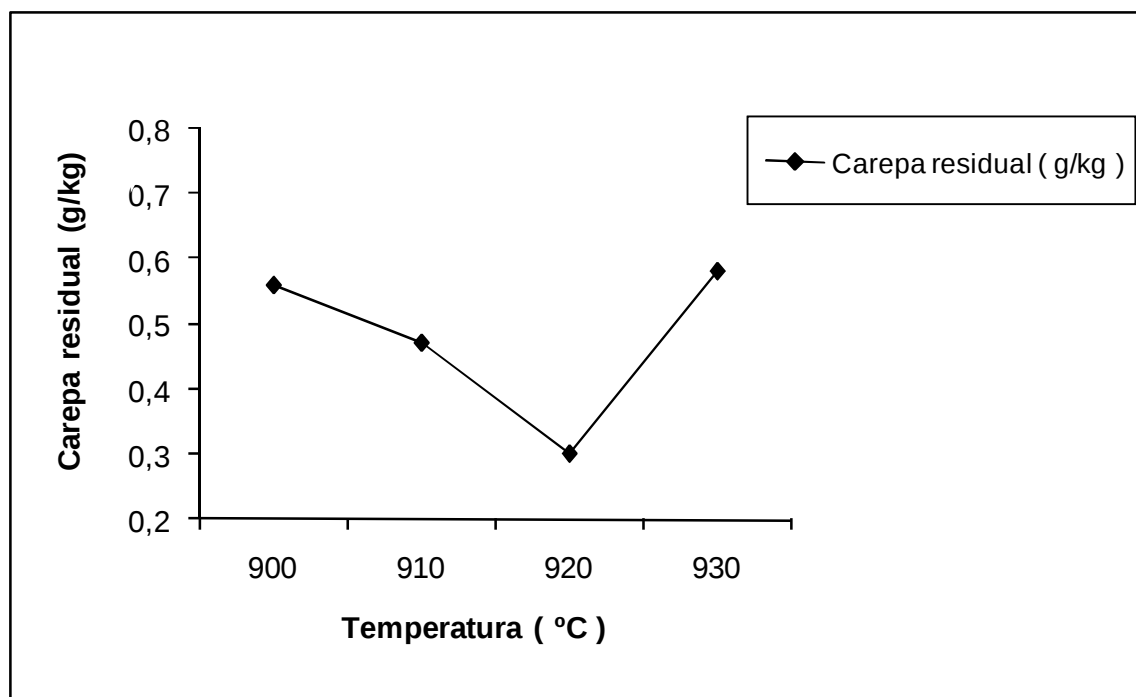


Figura 3.14: Efeito da temperatura de entrada no leito na adesão da carepa – adaptação ⁽¹⁴⁾.

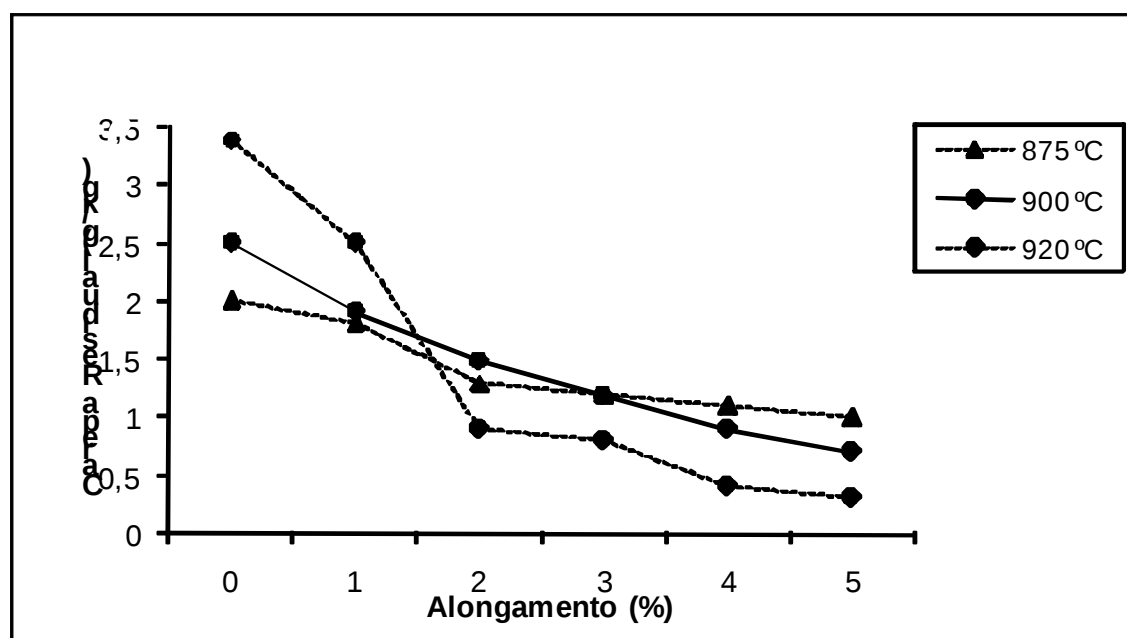


Figura 3.15: Efeito da temperatura de entrada no leito de resfriamento na adesão da carepa para um alongamento de (5%) – adaptação ⁽¹⁴⁾.

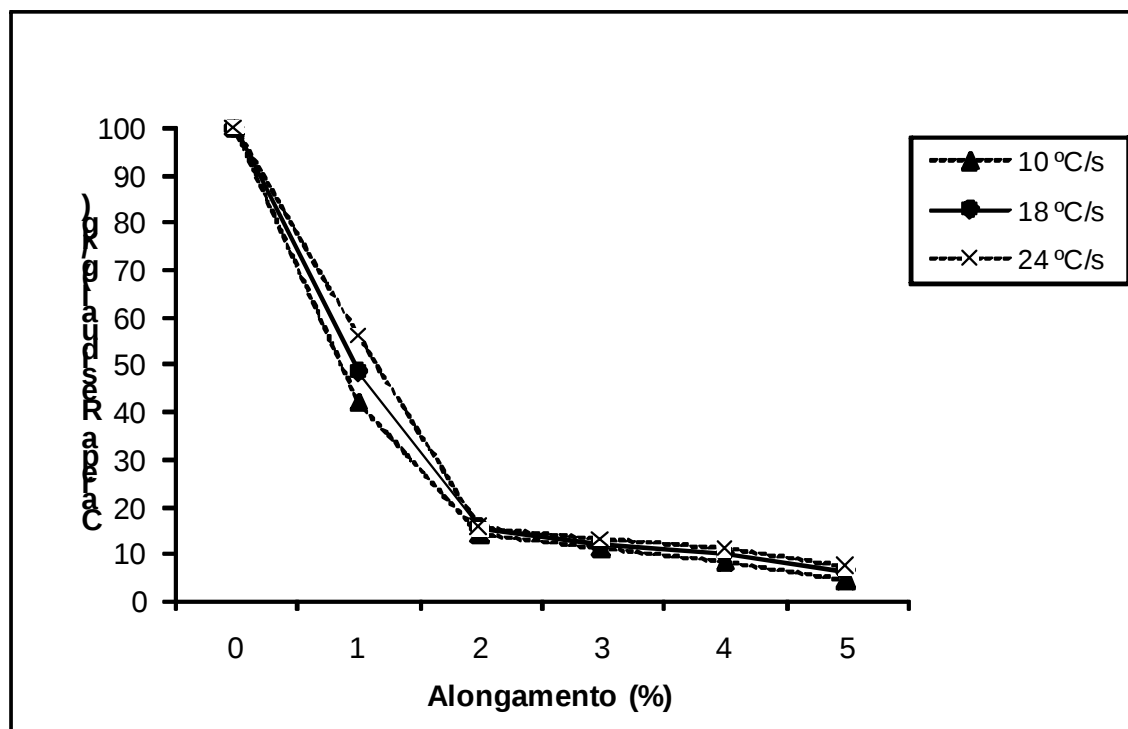
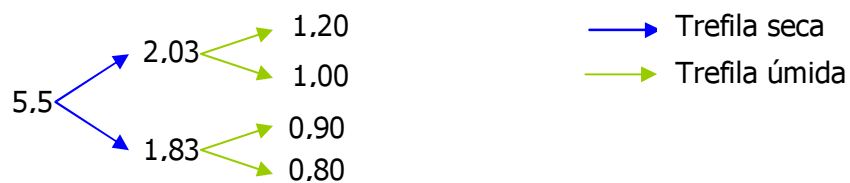


Figura 3.16: Efeito da taxa de resfriamento na adesão da carepa - adaptação ⁽¹⁴⁾.

3.3 – Trefilação do arame

A trefilação do aço AWS ER70S 6 ocorre de acordo com uma das seguintes escalas de passes, dependendo da bitola final:



Além do controle dimensional, uma remoção adequada da carepa antes da trefilação reduz a ocorrência de defeitos na superfície do arame, evitando irregularidades na camada cobreada do produto final e conseqüentes problemas na soldagem, (ocorrência de respingos, fluxo irregular de material e entupimento do bico de solda).

A descarepação é realizada por sucessivos dobramentos no material, passando o fio máquina por polias posicionadas a 90° umas das outras (sistema de dobramento reverso).

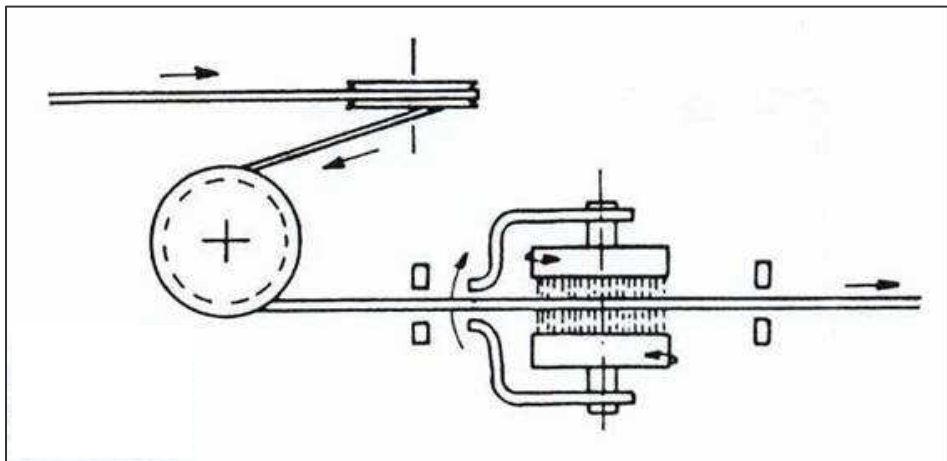


Figura 3.17: Esquema da descarepação por dobramento reverso ⁽³⁾.

Para uma completa remoção da carepa, seria necessário um alongamento de aproximadamente 12%. Na prática industrial, não é possível eliminar toda a carepa, pois seriam necessários roletes de dimensões muito reduzidas, que provocariam dobramentos severos e conseqüentes rupturas das regiões soldadas do fio máquina, prejudicando a produtividade do processo. Normalmente utilizam-se alongamentos de 6 a 8% entre as polias ⁽³⁾.

Para dimensionar as polias, aplica-se a seguinte equação:

$$\frac{d}{D+d} = A (\%) \quad (3.5)$$

Onde:

d é o diâmetro do fio máquina.

D é o diâmetro da polia.

A é o alongamento.

Após a primeira etapa, faz-se a limpeza final do fio máquina, onde a carepa residual é removida através do uso de escovas, lixas ou palha de aço. Esse processo auxiliar de limpeza deve ser feito de maneira moderada, para evitar o endurecimento ou o surgimento de defeitos na superfície do fio máquina ⁽¹⁵⁾.

O processo de trefilação é realizado em duas etapas. Na primeira, sabão em pó é utilizado como lubrificante. O arame chega ao final dessa fase com aproximadamente 2 mm de diâmetro.

A segunda etapa, chamada trefilação úmida ou submersa, se caracteriza pela utilização de lubrificante líquido, composto por uma solução de sabão e água. Nesta etapa ocorre a trefilação até a bitola final do arame, que geralmente varia de 0,80 a 1,2 mm.

4 – METODOLOGIA

Para avaliar os efeitos da temperatura de formação das espiras e da velocidade de resfriamento da bobina nas características da carepa, possibilitando a definição do melhor conjunto de parâmetros para o processo laminação e resfriamento, foram realizados diversos testes combinando as variáveis temperatura de entrada no leito e velocidade de resfriamento, que influenciam a qualidade final do aço AWS ER70S 6. Neste item serão apresentados os procedimentos experimentais para a realização dos testes e os ensaios e critérios utilizados para avaliar os resultados.

4.1 – Laminação de fio máquina

Após a produção de tarugos com qualidade interna e de superfície adequadas, a laminação ocorreu das seguintes maneiras:

- O fio máquina teve seu resfriamento iniciado a partir de diferentes temperaturas e submetido ao mesmo padrão de resfriamento (baixa velocidade dos rolos e tampas do LCC fechadas até o 14º módulo), proporcionando ao fio máquina uma baixa taxa de resfriamento. Essas condições favorecem a redução da fração volumétrica do constituinte MA e um maior crescimento da carepa;
- Após definida a temperatura de entrada do material no leito de resfriamento (teste anterior), as bobinas foram submetidas a diferentes condições de resfriamento para verificar as características da carepa (espessura e proporção de FeO).

Para a primeira bateria de testes, onde foram fixados os parâmetros do leito de resfriamento (número de tampas fechadas e velocidade dos rolos), foram escolhidas quatro temperaturas na entrada no leito de resfriamento. Foram avaliadas três bobinas em cada uma das temperaturas mostradas na tabela IV. 1:

Tabela IV. 1: Temperaturas para entrada no leito de resfriamento.

Temperatura entrada LCC (°C)	830	870	900	930
Configuração LCC	Tampas fechadas até o 14º módulo			

Na segunda bateria de testes, depois de selecionada, a temperatura de entrada no leito que apresentou melhores resultados na 1ª etapa, foram avaliadas as condições de resfriamento.

Tabela IV. 2: Parâmetros propostos para o leito de resfriamento, depois de fixada a temperatura de entrada do material.

Parâmetros do LCC	Tampas fechadas até o 14º módulo
	Abertura das tampas a partir do 9º módulo

4.2 – Ensaios

Além de verificar as características da carepa obtida, é fundamental acompanhar as mudanças na microestrutura do fio máquina relacionadas às diferentes situações impostas ao material.

Neste estudo foram empregados os seguintes exames e análises:

- Verificação do grau de remoção da carepa.
- Quantificação da carepa total.
- Tração (limite de resistência e estrição).
- Caracterização microestrutural.
- Determinação dos constituintes da carepa e sua proporção.
- Determinação da fração volumétrica do constituinte MA.

4.2.1 – Avaliação da quantidade de carepa e sua remoção

O método utilizado para avaliar as características básicas da carepa de um fio máquina, destinado à descarepação mecânica, consiste basicamente em: submeter corpos de prova representativos do produto a um alongamento de aproximadamente 7%, que se assemelha à deformação sofrida pelo fio máquina no processo industrial, e verificar a quantidade da carepa removida, a que se mantém no corpo de prova (carepa residual) e o peso total correspondente aos óxidos.

Primeiramente, devem-se desconsiderar as extremidades do corpo de prova (CP), pois nestas posições o contato com as castanhas (garras da máquina de tração) reduz a acuidade dos resultados. Isso é feito decapando-se 50 mm de cada extremidade do CP de 400 mm com HCl. Em seguida, pesa-se o CP (M_1).

O comprimento útil do CP é então submetido ao alongamento especificado, com o auxílio de um extensômetro. A carepa que se soltou do CP mas não caiu deve ser removida delicadamente, utilizando-se um pincel de cerdas macias. Nova pesagem é realizada (M_2).

Após a deformação plástica, que simula o processo de descarepação, o CP é completamente decapado e pesado mais uma vez (M_3). Nesta etapa, recomenda-se o uso de um inibidor junto com o HCl. Este inibidor diminui a ação agressiva do ácido na superfície do aço, aumentando a confiabilidade dos resultados.

As massas obtidas durante o ensaio são trabalhadas e interpretadas de acordo com as equações abaixo:

$$\frac{M_1 - M_3}{M_1} 1000 = \text{carepa total, em g/kg} \quad (4.1)$$

$$\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3} 100 = \text{carepa removida, em \%} \quad (4.2)$$

$$1 - \left(\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3} 100 \right) = \text{carepa residual, em \%} \quad (4.3)$$

4.2.2 – Verificação das propriedades mecânicas do fio máquina

As propriedades mecânicas mais importantes para a aplicação MIG são o limite de resistência à tração (LR) e a estrição, ou redução de área sofrida durante o ensaio (RA).

Essas propriedades mostram se o fio máquina tem condições de resistir bem às fortes deformações sofridas durante a trefilação, sem se romper ou apresentar estrição. A maioria dos trefiladores deste aço não utiliza tratamento térmico, o que torna ainda mais crítico o controle dessas variáveis.

O corpo de prova é submetido a tensões de tração crescentes, enquanto o equipamento registra o comportamento do fio máquina a cada momento. Após o término do ensaio, mede-se o diâmetro final da região rompida, determinando-se então a estrição do CP. O limite de resistência é obtido pela razão entre a tensão máxima suportada pelo CP, e sua área inicial.

4.2.3 – Caracterização microestrutural

Ao se submeter o fio máquina a altas temperaturas e baixa taxa de resfriamento, corre-se o risco de haver crescimento anormal dos grãos, o que seria prejudicial às suas propriedades mecânicas.

Anormalidades durante o processo podem provocar a ocorrência de decarbonetação e grãos colunares próximos à superfície do fio máquina, gerando um produto com propriedades heterogêneas ⁽¹⁹⁾.

Para monitorar essas possíveis ocorrências, foram realizadas análises micrográficas onde o tamanho de grão ferrítico foi medido em cada uma das

condições de trabalho praticadas, tendo-se o cuidado de observar com atenção o tamanho e a forma dos grãos nas regiões próximas à superfície do fio máquina.

4.2.4 – Determinação dos constituintes presentes na carepa e sua proporção

O recurso utilizado para identificar os óxidos que constituem a carepa do fio máquina para fabricação de arame para soldagem MIG foi o MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura).

A opção pela utilização do MEV foi feita após uma avaliação da discrepância entre a análise realizada pelo equipamento e o teor de oxigênio de cada óxido, calculado pela massa molecular. Como os resultados foram altamente satisfatórios, permitindo a identificação segura de cada um dos óxidos presentes na carepa (figura 4.1), e a Gerdau Açominas dispõe do equipamento em um de seus laboratórios, decidiu-se por sua utilização.

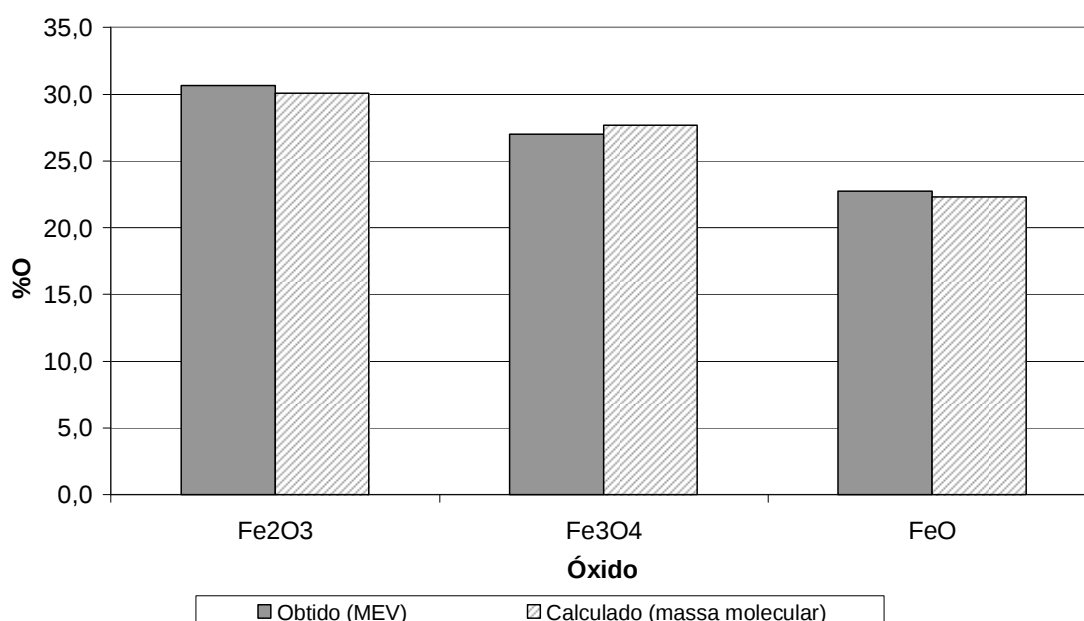


Figura 4.1: Porcentagem de oxigênio calculado x medido através do MEV.

4.2.5 – Determinação da fração volumétrica do constituinte MA

A fração volumétrica do constituinte MA presente no fio máquina foi determinada através da análise micrográfica da seção transversal de amostras de cada um dos conjuntos de parâmetros avaliados, após embutimento, polimento e ataque com o reativo nital 3%.

A quantificação do constituinte MA é feita pela contagem de interceptos de um reticulado, com aumento de 500X. Esta análise é realizada na região central das amostras, onde a ocorrência do constituinte MA é preferencial, por ser a região com tendência a sofrer maior segregação.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão mostrados os resultados obtidos para as diferentes combinações de parâmetros avaliados.

5.1 – Grau de descarepação

A figura 5.1 mostra a variação do grau de descarepação obtido para diferentes temperaturas de entrada no leito de resfriamento (TLH).

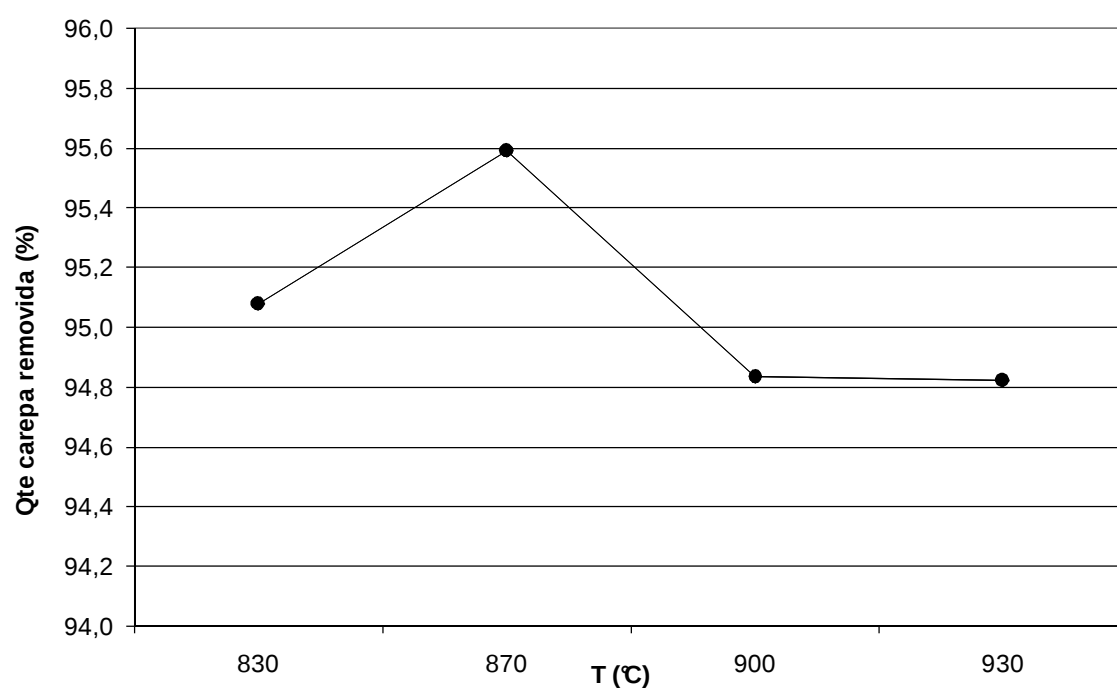


Figura 5.1: Porcentagem de descarepação x TLH.

Considerando-se a especificação de 80%, mínimo de descarepação fornecida por clientes, os resultados mostraram que para qualquer um dos conjuntos de parâmetros avaliados na 1ª bateria de testes, o índice de descarepação foi excelente, mantendo-se sempre na faixa de 95%.

Tal fato se explica pela baixa taxa de resfriamento (a temperaturas acima de 600°C) sofrida pelo fio máquina, que permite o crescimento da camada de óxidos ao longo do leito, formando uma carepa com espessura suficiente para ser

adequadamente removida por meios mecânicos, independente da temperatura inicial de resfriamento utilizada nos testes.

5.2 – Quantificação da carepa total

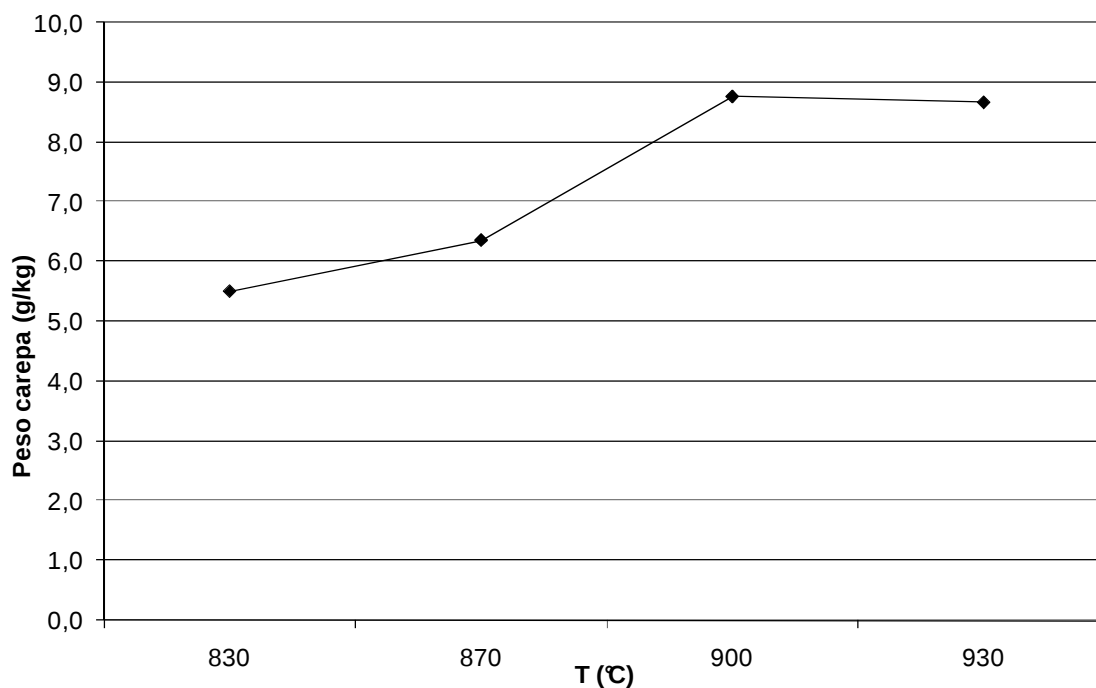


Figura 5.2: Quantidade de carepa x TLH.

Os resultados exibidos na figura 5.2 mostram que a temperatura de entrada do material no leito de resfriamento exerce considerável influência na espessura da carepa formada. Quanto maior a temperatura do fio máquina no início do resfriamento, maior será a espessura da camada de óxidos ⁽¹⁶⁾.

Analisando apenas do ponto de vista da espessura da carepa, pois quanto maior sua espessura mais fácil será sua remoção, ou seja, menor a porcentagem de óxidos residuais ⁽¹⁶⁾, a melhor condição de processo seria aquela com maior temperatura de entrada no leito de resfriamento. No entanto, é importante evitar a

ocorrência de *blistering*, e todo o transtorno proveniente da formação de uma camada de óxido rica em Fe_3O_4 .

5.3 – Tração (limite de resistência e estrição)

Em geral, os clientes solicitam que o limite de resistência do fio máquina para soldagem MIG atinja no máximo 530 MPa, para que o processo de trefilação possa ocorrer sem tratamento térmico intermediário (recozimento). Todas as amostras avaliadas atenderam a esta especificação, conforme pode ser observado na figura 5.3.

Nota-se ainda a tendência do limite de resistência médio do fio máquina cair na medida em que a temperatura de entrada no leito (TLH) aumenta. No entanto essa diferença é muito pequena, devido à aplicação de uma baixa taxa de resfriamento em todos os testes. Experimentos anteriores mostraram que, quando aplicada uma elevada taxa de resfriamento para este aço, os resultados de limite de resistência se situam em torno de 580 MPa.

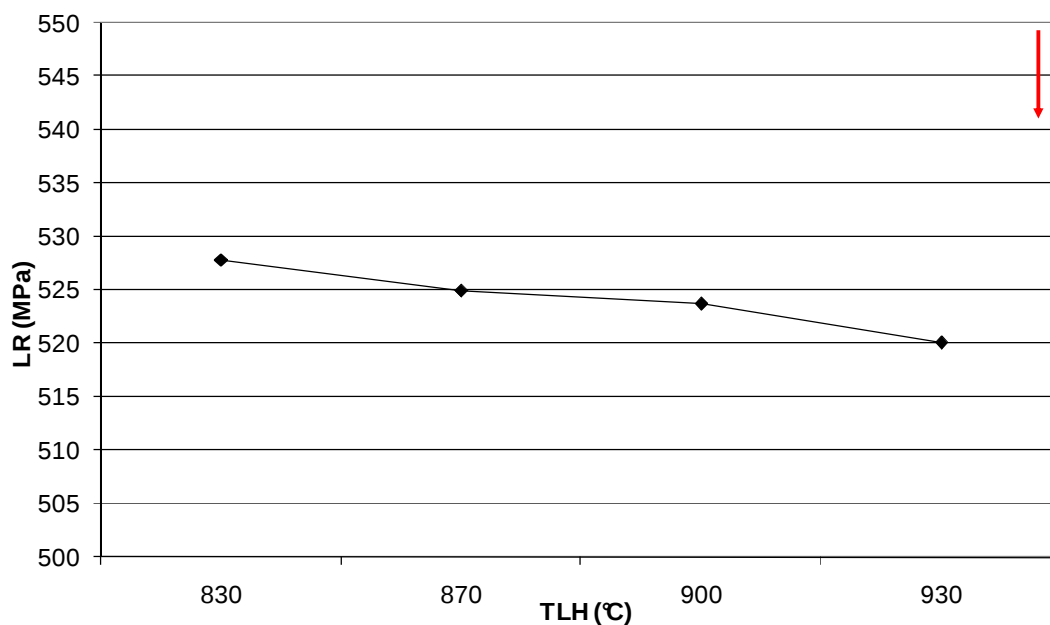


Figura 5.3: Variação do limite de resistência em função da temperatura de entrada no leito de resfriamento.

Como o fio máquina é trefilado para bitolas finas (até 0,8 mm), na maioria dos clientes que não utiliza recozimento intermediário (entre a trefila seca e a úmida), um aumento na TLH favorece a trefilabilidade. Adicionalmente, aços mais macios provocam menor desgaste das fieiras, gerando ganhos no processo de trefilação.

A estricção não apresentou variações consideráveis para as diferentes temperaturas avaliadas, conforme a figura 5.4.

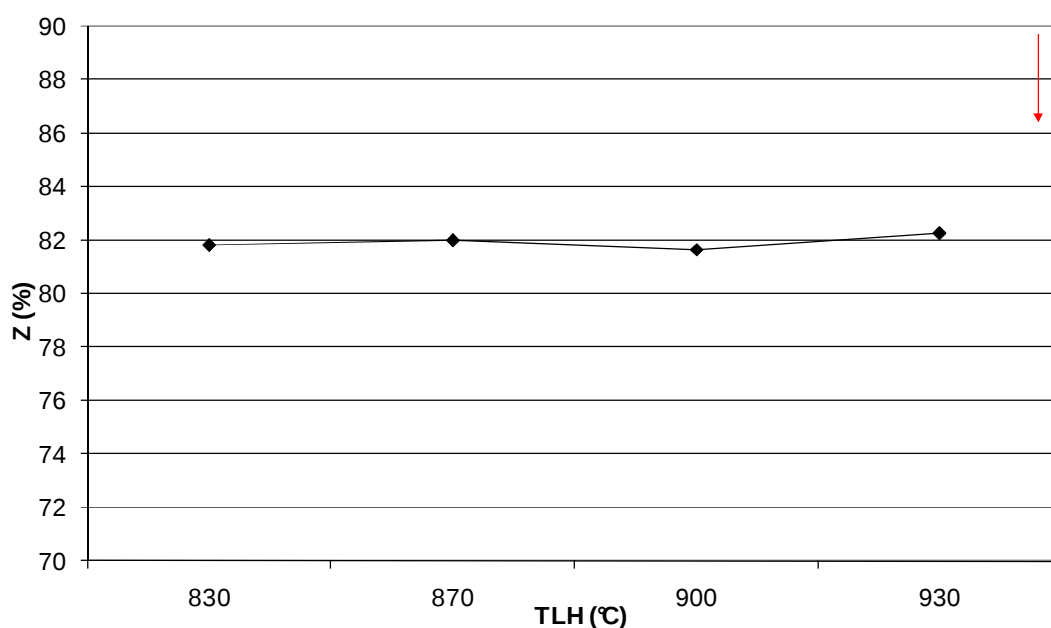


Figura 5.4: Variação da estricção em função da temperatura de entrada no leito de resfriamento

A baixa taxa de resfriamento aplicada neste aço favorece a uniformidade de resultados de estricção, mesmo sob diferentes temperaturas de início de resfriamento.

No que dizem respeito às propriedades mecânicas, os resultados mostraram que para o aço para soldagem MIG, o efeito da temperatura de entrada do fio máquina no leito de resfriamento é bastante limitado. Este fato se explica pelas baixas taxas de

resfriamento às quais o fio máquina foi submetido, que mantiveram sua microestrutura (constituintes, tamanho de grão) inalterada em todas as situações.

5.4 – Caracterização microestrutural

Todas as amostras analisadas apresentaram aspecto semelhante: microestrutura constituída por ferrita e perlita, com tamanho de grão ferrítico médio 7 (ASTM E112), de formato equiaxial, sem ocorrência de grãos colunares.

5.5 – Determinação dos constituintes da carepa e sua proporção

Pela análise realizada no MEV, observa-se que a camada mais interna (interface aço/carepa) é bastante delgada, irregular e rica em Si, sendo caracterizada como faialita.

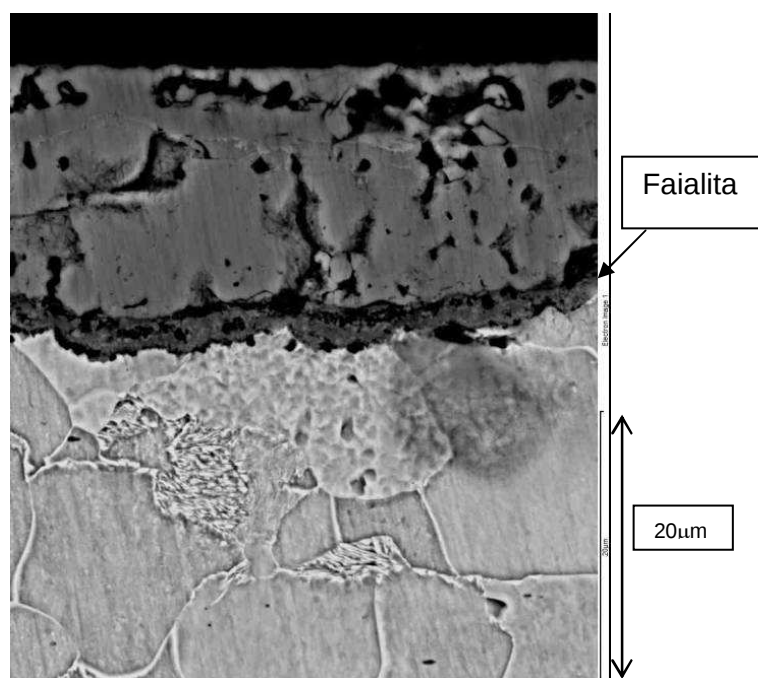


Figura 5.5: Presença de faialita na carepa (MEV).

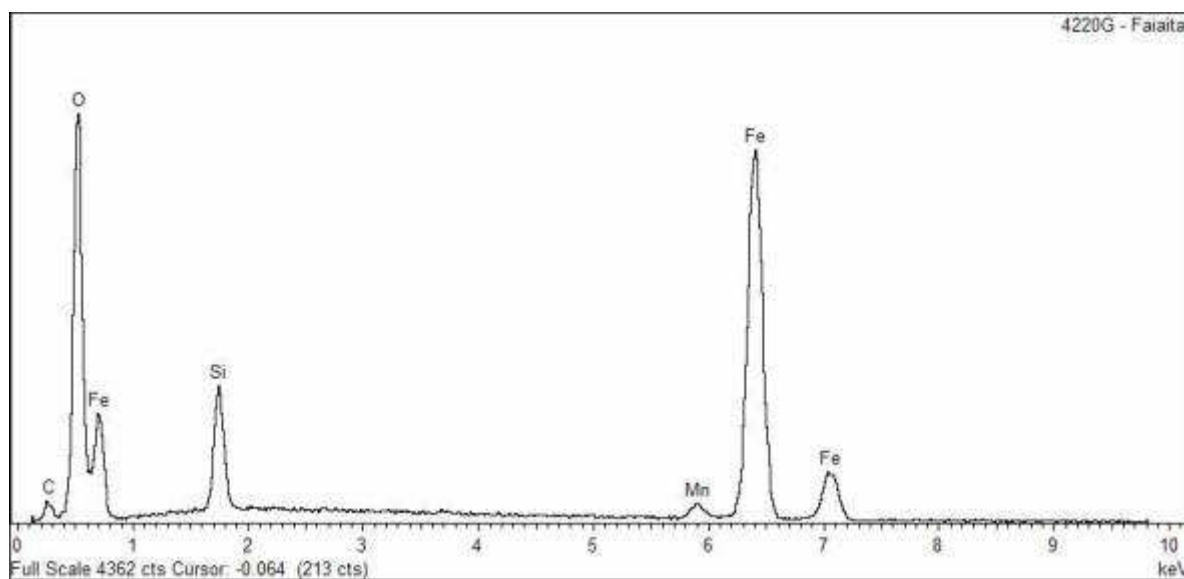


Figura 5.6: Análise qualitativa da interface aço/carepa (faialita).

As demais camadas, a partir da faialita, tiveram sua composição avaliada, e apresentaram os resultados abaixo, tendo sido bem caracterizado cada um dos óxidos presentes, a partir da quantificação do oxigênio presente em cada uma das fases observadas durante análise via MEV.

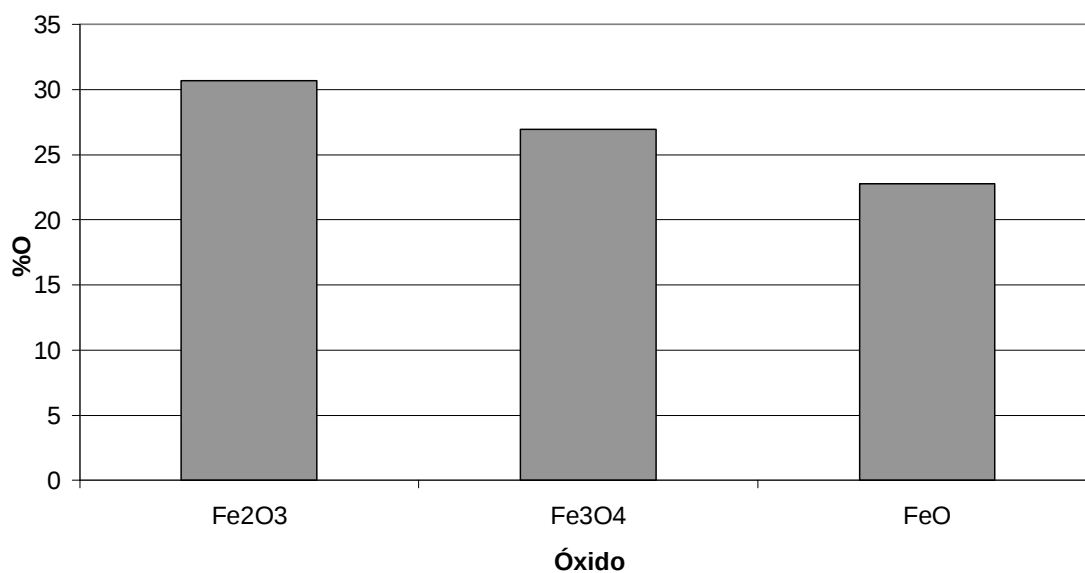


Figura 5.7: Porcentagem de oxigênio das camadas da carepa.

A figura 5.8 mostra o comportamento dos constituintes medidos (FeO e $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) e da carepa total com o aumento da temperatura de entrada do fio máquina no leito de resfriamento.

A Fe_2O_3 foi medida juntamente com a Fe_3O_4 devido à sua pequena espessura e variabilidade desprezível com as alterações propostas. A espessura da faialita não foi registrada pelo mesmo motivo.

Nos ensaios realizados, verificou-se que para todas as condições avaliadas de temperatura de início de resfriamento, a relação $\text{FeO}/\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ foi próxima de 1, especialmente até 900°C , conforme pode ser visto na figura 5.9.

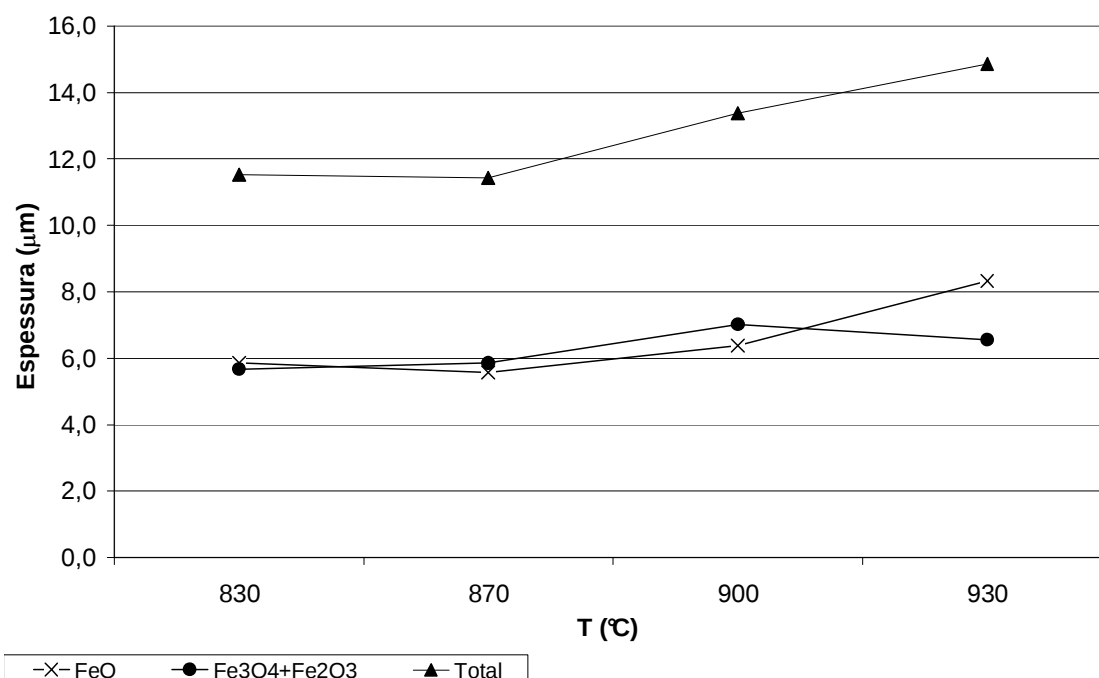


Figura 5.8: Espessura dos constituintes x TLH.

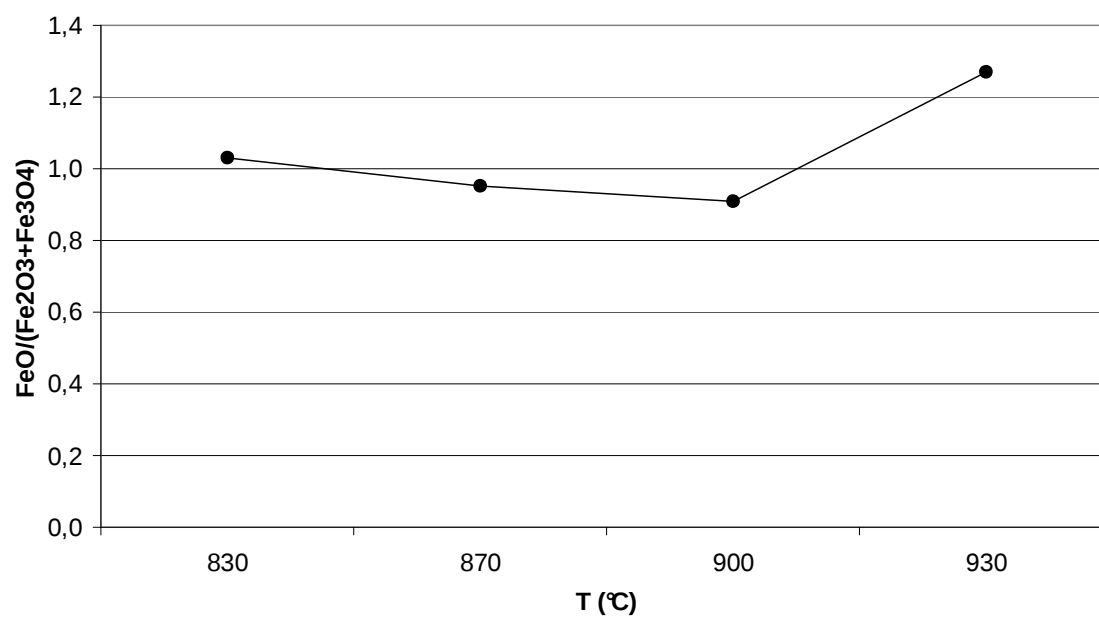


Figura 5.9: Proporção entre os constituintes x TLH.

Considerando que quanto maior a temperatura de entrada no leito de resfriamento (TLH), maior a espessura da carepa e menor o limite de resistência, e que a temperaturas da ordem de 940°C pode ocorrer *blistering*, a temperatura que se mostra mais adequada ao processo é 900°C.

5.6 – Fração volumétrica do constituinte MA

Todas as amostras analisadas apresentaram fração volumétrica do constituinte MA menor que 0,4%, (0,29 a 0,38%), sem que fossem identificadas diferenças consideráveis nos resultados para as temperaturas de entrada no LCC praticadas, conforme evidenciado na figura 5.10.

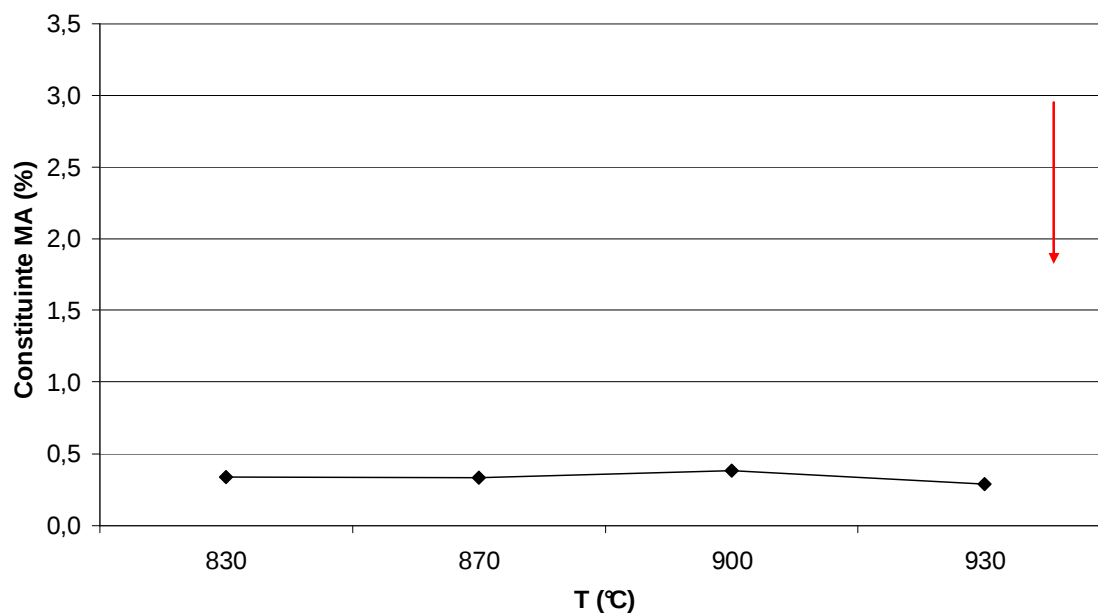


Figura 5.10: Variação da fração volumétrica do constituinte MA em função da temperatura de entrada no leito de resfriamento.

Como a especificação máxima para o constituinte MA estabelecida pelos clientes mais exigentes é da ordem de 3% em volume, pode-se desconsiderar esta variável para os parâmetros de processo utilizados.

5.7 – Comportamento da carepa em função do tempo de permanência a temperaturas acima de 600°C

Com a diminuição do número de tampas fechadas de 27 para 15, e conseqüente redução no tempo de permanência do fio máquina a temperaturas acima de 600°C, houve uma redução da ordem de 20% na espessura da carepa, conforme resultados exibidos na figura 5.11.

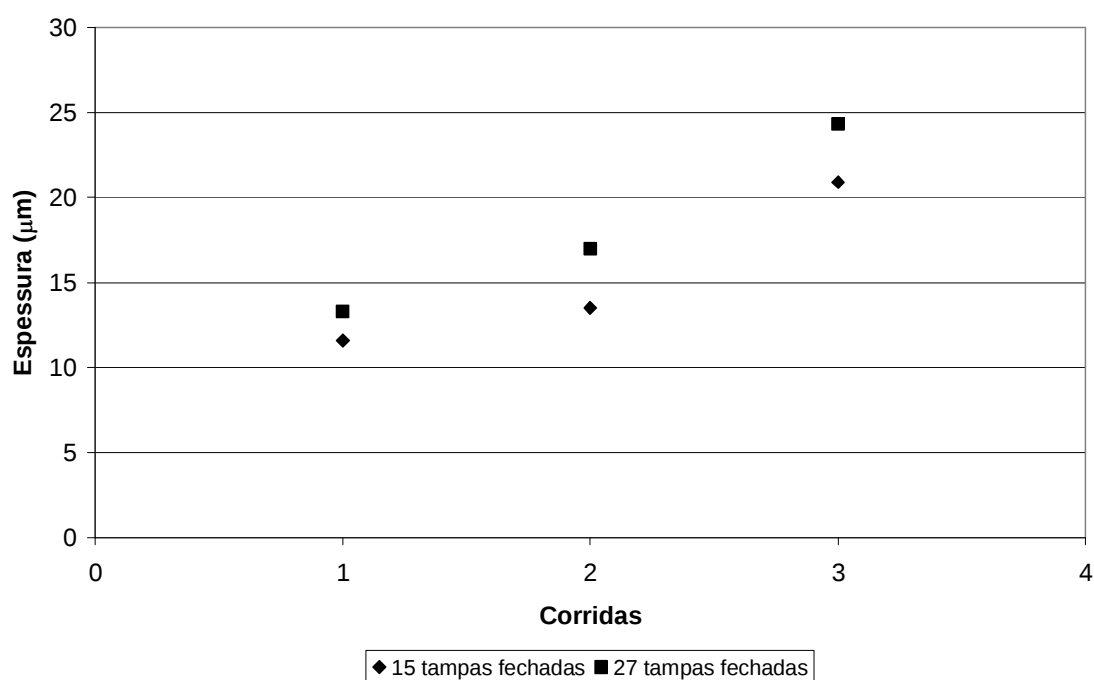


Figura 5.11: Variação da espessura da carepa em função do tempo de permanência do fio máquina a temperaturas acima de 600°C.

5.8 – Avaliação global

Os resultados obtidos podem ser resumidos na tabela V.1, que mostra que a melhor condição de processo dentre as avaliadas para este material é a que tem temperatura de início de resfriamento entre 870 e 900°C, com tampas fechadas até o 14º módulo (27 tampas fechadas).

Tabela V. 1: Resultados obtidos para as diferentes condições de resfriamento avaliadas.

TLH (°C)	Nº tampas fech.	LR (MPa)	Descarepação (%)	Observação
830	27	528	95,1	LR próximo ao máximo
870	27	525	95,6	Atende
900	27	523	94,8	Atende
930	27	518	94,8	Risco de haver <i>blistering</i>

6– CONCLUSÕES

Foram testadas diferentes condições de resfriamento de um fio máquina para fabricação de arames para soldagem MIG, com o objetivo de definir o melhor conjunto de parâmetros a serem utilizados na obtenção das características necessárias à aplicação, com foco na carepa.

A qualidade interna (% do constituinte MA) não foi significativamente afetada pelos diferentes parâmetros testados.

A estricção não foi afetada pelas diferentes condições de resfriamento. O limite de resistência sofre pequenas reduções à medida que a temperatura de entrada do material no leito de resfriamento é elevada. No entanto, as variações estão dentro da faixa especificada para o aço.

Temperaturas mais altas de entrada no leito de resfriamento proporcionam a formação de uma camada de óxidos mais espessa, e com maior proporção de FeO que, combinada com o resfriamento lento geram uma proporção aproximada de 1:1 entre os constituintes FeO e Fe₃O₄.

Para o teste com diferentes taxas de resfriamento, a utilização da menor taxa (27 tampas fechadas) apresentou carepa 20% mais espessa, e uma maior descarepação média (+0,5%).

Considerando todos os parâmetros envolvidos, a melhor combinação avaliada foi o resfriamento com temperatura de entrada no leito de 870°C e tampas fechadas até o 14º módulo. Esta combinação de parâmetros gerou uma carepa mais espessa, devido ao maior tempo de permanência do fio máquina a altas temperaturas, que permitiu o crescimento da FeO e, conseqüentemente, uma remoção mais efetiva da carepa.

7– RELEVÂNCIAS DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos no presente trabalho foram utilizados para definir os parâmetros de resfriamento do fio máquina para soldagem MIG na Gerdau Açominas.

8– REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. LE PERA, F. S. Improved etching technique to emphasize martensite and bainite in high-strength dual-phase steel. *Journal of Metals*, p.32-39, 1980.
2. SILVA, C. R. Relatório Interno Açominas, Maio, 2000.
3. PENNA, J. A. CUNHA, H. M. Formação de carepa e descarepação mecânica de fio máquina. XXXII Congresso Internacional da ABM, Contribuição Técnica nº 1422, Julho, 1977.
4. SCWERDTFEGER, K., ZHOU, S. A contribution to scale growth during hot rolling of steel. *Steel Research* 74, p.538-548, nº09, 2003.
5. GILLSTRÖM, P., JARL, M. Determination of scale amount on wire of carbon steels and low alloyed steels. *Wire Journal International*, p. 73-77, set. 2003.
6. TOMINAGA, J., WAKIMOTO, K., MORI, T, MURAMAKI, M., YOSHIMURA, T. Manufacture of wire rods with good descaling property. *Transactions ISIJ*, p. 646-656, v. 22, 1982.
7. CHEN, R. Y., YUEN, W. Y. D., MAK, T. Oxide scale growth and its pickling characteristics of hot-rolled steel strip. 43rd MWSP Conference Proceedings, ISS, p. 287-299, v. XXXIX, 2001.
8. BIROSCA, S., DINGLEY, D., HIGGINSON, R. L. Microstructural and microtextural characterization of oxide scale on steel using electron backscatter diffraction. *Journal of Microscopy*, p. 235-240, v. 213, nº 3, March, 2004.
9. BLAZEVIC, D. T. Tertiary rolled in scale: the hot strip mill surface problem of the 1990's. 37th MWSP Conference Proceedings, ISS, p. 33-38, vol. XXXIII, 1996.
10. CHEN, R. Y., YUEN, Y. D. Examination of oxide scales of hot rolled steel products. *ISIJ International*, p. 52-59, v. 45, nº 1, 2005.

11. DICK, L. F. P., VITIELLO, R., MONTILLA, J. Estudo para otimização do processo de decapagem química de aços carbono em H_2SO_4 . Relatório Técnico Gerdau São José dos Campos e ELETROCORR, Jan., 2003.
12. TANIGUCHI, S., YAMAMOTO, K., MEGUMI, D., SHIBATA, T. Characteristics of scale/substrate interface area of Si-containing low carbon steels at high temperature. Materials Science and Engineering A308, p.250-257, 2001.
13. KIZU, T., NAGATAKI, T., HOSOYA, H. Effects of chemical compositions and oxidation temperature on the adhesion of scale in plain carbon steels. ISIJ International, p.1494-1501, vol 41, nº 12, 2001.
14. GENÈVE, D., FRANÇOIS, M. Optimization of mechanical descaling for tire cord application. Wire Journal International, p.54-60, maio. 1994.
15. CONFENTE, M., GENÈVE, D., RESIAK, B., JALLON, M. Effects of mechanical descaling on the surface of low carbon wire rod for drawing or cold heading. Wire Journal International, p.238-242, Feb. 1995.
16. QUEIROGA, R. H. B., SANTOS, R. J. M., SANTOS, D. B. The influence of cooling conditions of steel wire rod on scale formation and its application on mechanical descaling. Wire Journal International, p. 53-63, out. 1995.
17. FUKAGAWA, T., OKADA, H., MAEHARA, Y. Mechanism of red scale defect formation in Si-added hot-rolled steel sheets. ISIJ International, p. 906-911, vol. 34, nº 11, 1994.
18. FILATOV, D., PAWELSKI, O., RASP, W. Hot-rolling experiments on deformation behavior of oxide scale. Steel Research International, p. 20-25, vol. 75, nº 1, 2004.
19. SANTOS, D. B., BUONO, V. T. L. Exames metalográficos e análises químicas de amostras de fio máquina laminado a quente realizados através de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e microsonda Relatório Técnico para a Gerdau Usiba, Fevereiro, 2001.

9– DADOS BIOGRÁFICOS DA AUTORA

Daniella de Sousa Cunha nasceu em 22 de janeiro de 1976 em Santos, SP.

Graduou-se em Engenharia Metalúrgica pela Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto em Fevereiro de 2001. Trabalha desde então na Gerência de Produtos da Gerdau Açominas, em Ouro Branco, MG.