

PAULA FERNANDES LOPES

Avaliação dos limites de fabricação de cabos metálicos através de uma
análise mecânica do processo.

São Paulo

2013

PAULA FERNANDES LOPES

Avaliação dos limites de fabricação de cabos metálicos através de uma
análise mecânica do processo.

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Engenheira.

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de
Materiais

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Geraldo Schön

São Paulo

2013

AGRADECIMENTOS

Ao longo da realização deste trabalho eu tive a oportunidade de trabalhar com uma equipe formada por pessoas muito competentes e colaboradoras que contribuíram de diferentes formas para o desenvolvimento desse projeto de conclusão de curso.

Eu agradeço ao Professor Dr. Cláudio Geraldo Schön por sua atenção e pela orientação. Tenho a agradecer a Jérémie Toussain, Michel Besseyrias e Gaëtan Davayat que também me orientaram, me acolheram em sua equipe de trabalho e partilharam comigo seus conhecimentos e suas experiências ao longo dos seis meses de estágio realizados.

Agradeço igualmente aos meus pais e às minhas irmãs que estão sempre presentes em minha vida e me incentivam a buscar novos desafios e a superar as dificuldades encontradas.

Agradeço também à todas as pessoas que colaboraram para o avanço de meu trabalho. Aos especialistas em metalurgia e industrialização Pierre Morisot, Eric Colin e Pascal Chavarot. Aos técnicos e operadores da planta piloto Claude Donadieu, Olivier Culpo e Fernand Mendes pela simpatia e pela disponibilidade para me auxiliar durante a realização dos experimentos.

Não poderia esquecer meus amigos mais sinceros, que ao longo dos últimos anos foram meus companheiros e conselheiros: Caio Liberato, Carla Imoto, Rodrigo Dalti, Rodrigo Inocentes, Camila Gushiken, Alan Lamotte, Fernando da Cunha e Daniel de la Fuente.

Finalmente, agradeço a todos meus professores da EPUSP e da Chimie ParisTech por me apresentarem a diversidade de materiais, de tecnologias e de desenvolvimento humano relacionados ao estudo dos materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos.

RESUMO

Atualmente o segmento de fabricação de pneumáticos visa à diminuição do peso dos pneus a partir do aperfeiçoamento da resistência ao rolamento que está ligado à redução no consumo de combustível pelos veículos. Sendo assim, para alcançar essa meta, busca-se a utilização de reforços metálicos constituídos de fios de aço de maior resistência mecânica, denominados fios UHT – *Ultra High Tensile*. Portanto, este estudo é destinado à avaliação dos limites de fabricação de cabos metálicos sob uma análise mecânica dos processos de trefilação úmida e de produção de cabos metálicos.

A trefilação úmida tem por objetivo reduzir o diâmetro do fio de aço através de sua passagem por fieiras. Esse processo gera modificações profundas na microestrutura do aço, tensões residuais em diferentes escalas e uma diversidade de heterogeneidades e, ou defeitos presentes na superfície e, ou no interior do material. Estas modificações estão relacionadas às propriedades microestruturais iniciais do material, e aos parâmetros do processo.

A produção de cabos metálicos é feita a partir dos fios de aço trefilados. Esses fios são submetidos a diferentes solicitações mecânicas e o comportamento deles nessa etapa depende da microestrutura do material obtida ao longo da trefilação úmida.

Neste trabalho foram avaliados os diversos parâmetros envolvidos nos processos de trefilação úmida e de fabricação de cabos metálicos. Os resultados obtidos contribuem para o aperfeiçoamento dos processos estudados e para o desenvolvimento da utilização de fios de aço UHT nos pneus de alta tecnologia.

ABSTRACT

Nowadays the tires manufacturing aim to reduce the weight of its products by the improvement of the rolling resistance, which is related to the reduction of the fuel consumption by transport vehicles. For this reason, ultra-high tensile (UHT) resistance steel wires for the metallic reinforcement of those tires are being developed. Therefore, the aim of this study is to assess manufacturing critical aspects by a mechanical analysis of both wet-drawing and assembly processes.

The wet-drawing reduces the diameter of the steel wire by passing it through wire dies. This process generates deep modifications of the steel microstructure, residual stress in different scales and a range of heterogeneities and, or defects on the surface and bulk of the material. These changes are related to the initial microstructure properties of the material, and also they are related to the process parameters.

The assembly of the steel cords is made with those steel wires. During this process, the steel wires are subjected to different mechanical solicitations, and their behavior depends on the materials microstructure, obtained in the wet-drawing process.

In this work, many parameters of both process and their role on the product quality were evaluated. The results contribute to the improvement of the studied processes and to the development of the application of UHT steel wires in high-tech tires.

Key-words: tires, wet-drawing, steel cords

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Distribuição da produção mundial de pneus em 2012	2
Figura 2.2 – Indústria Brasileira de pneus em 2012	3
Figura 2.3 – Estrutura de um pneu	6
Figura 2.4 – Exemplo de estrutura de um pneu convencional	9
Figura 2.5 – Exemplo de estrutura de pneu radial	9
Figura 2.6 – Classificação dos domínios de resistência mecânica pela Michelin.	11
Figura 2.7 – Processo de transformação de fios de aço em reforços metálicos para pneus	12
Figura 2.8 – Diagrama de fases ferro – carbono.....	13
Figura 2.9 – Esquema de uma linha de tratamento térmico	14
Figura 2.10 – Ciclo térmico empregado no tratamento térmico dos fios de aço.....	15
Figura 2.11 – Exemplos de microestruturas de aços alto carbono (a) perlita, (b) matriz perlítica e bainita, (c) matriz perlítica e martensita.	17
Figura 2.12 – Observação ao MEV da microestrutura perlítica lamelar de fios de aço atacados ao nital à 1% (a) após passagem pela primeira fieira e (b) na saída da trefilação seca.	18
Figura 2.13 – Distância interlamelar da perlita em função do diâmetro do fio de aço.....	20
Figura 2.14 – Curva de encruamento do fio de aço à 0,9% em massa de carbono.	21
Figura 2.15 – Fieira usada na trefilação. Em (a) é apresentada uma foto [26] e em (b) tem-se o perfil de uma fieira e suas principais zonas 1,2,3 e 4	22
Figura 2.16 – Balanço de tensões envolvidas na trefilação.....	24
Figura 2.17 – Sentidos de formação da estrutura helicoidal dos cabos metálicos.....	29
Figura 2.18 – Arquitetura formada por (a) 2 fios, (b) uma alma e uma camada externa de fios e (c) um núcleo, uma alma e uma camada externa de fios.	30
Figura 2.19 – Passo da corda de aço.....	30

Figura 2.20 – Fabricação de cabos por bobina de alimentação rotativa.....	31
Figura 2.21 – Fabricação de cabos por bobina de recepção rotativa.....	31
Figura 2.22 – Esquema das solicitações submetidas pelo fio durante sua passagem por uma polia.....	32
Figura 4.1 – Tipo de máquina de trefilação úmida.....	34
Figura 4.2 – Esquema da máquina protótipo de fabricação de cabos metálicos.	38
Figura 4.3 – Máquina protótipo de torção e distorção.....	38
Figura 4.4 – Esquema da máquina de fabricação de cabos por bobinas de alimentação e de recepção rotativas.	39
Figura 5.1 – Parâmetros geométricos da máquina industrial empregados no cálculo da tensão do semi-arco.	47
Figura 6.1 – Medidas de potência útil realizadas na máquina de trefilação úmida.....	52
Figura 6.2 – Medidas de intensidade realizadas na máquina de trefilação úmida.....	53
Figura 6.3 – Relação linear entre velocidade de produção e potência útil consumida na trefilação.	56
Figura 6.4 – Exemplos de rupturas provenientes dos testes de torção simples realizados na máquina protótipo.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Fios de aço utilizados nos testes de torção simples e de torção e distorção.....	37
Tabela 5.1 – Exemplos de rotas de redução de diâmetro dos fios de aço utilizados.....	42
Tabela 5.2 – Exemplo dos principais parâmetros utilizados nos cálculos do software de simulação de esforços na trefilação.....	44
Tabela 6.1 – Influência conjunto de fieiras na potência útil calculada consumida pelo processo.....	50
Tabela 6.2 – Influência da rota de redução de diâmetro do fio sobre a potência útil consumida pela máquina de trefilação.....	51
Tabela 6.3 – Comparaçao entre valores de potência útil calculados e medidos para as diferentes rotas de redução de diâmetro do fio.....	54
Tabela 6.4 – Influência da velocidade de trefilação para uma mesma rota de redução de diâmetro e mesmo conjunto de fieiras.....	55
Tabela 6.5 – Efeito do teor de carbono do aço sobre o nível de torção do fio.....	58
Tabela 6.6 – Efeito do conjunto de fieiras sobre o comportamento do fio nos testes de torção simples.....	59
Tabela 6.7 – Teste de torção simples empregando diferentes tensões de desenrolamento das bobinas de fios envelhecidos em estufa à 1h e 150°C.....	61
Tabela 6.8 – Testes de torção e distorção em máquina protótipo.....	62
Tabela 6.9 – Síntese dos limites atuais de fabricação de cabos metálicos relacionados aos parâmetros do processo e aos equipamentos utilizados.....	66

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANIP – Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos

HT – High Tensile

SHT – Super High Tensile

UFTP – Última fiação com taxa de redução de diâmetro pequena

UHT – Ultra High Tensile

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	II
ABSTRACT	III
LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	VI
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	VII
1.INTRODUÇÃO.....	1
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1.Os pneumáticos	2
2.1.1.Panorama da produção de pneus	2
2.1.2.Estrutura e função	4
2.1.3.Tipos de pneu: pneu convencional e pneu radial.....	8
2.1.4.Processo de fabricação	10
2.2.Os reforços metálicos no pneu.....	11
2.3.Trefilação úmida.....	20
2.3.1.Microestrutura do material	20
2.3.2.Variáveis do processo de elaboração de fios de aço.....	24
2.4.Cabos metálicos.....	29
2.4.1.Estrutura dos cabos metálicos.....	29
2.4.2.Características do processo de fabricação de cabos metálicos	31
3.OBJETIVO.....	33
4.MATERIAIS	34
4.1.Trefilação úmida.....	34
4.2.Fabricação de cabos metálicos	36
5.MÉTODOS	41

5.1.Trefilação úmida: avaliação dos limites de elaboração dos fios de aço	41
5.1.1.Software de simulação de esforços na trefilação úmida.....	41
5.1.2.Análise do funcionamento da máquina de trefilação.....	44
5.2.Capacidade dos fios de aço em formarem cabos metálicos.....	45
5.2.1.Teste de torção simples.....	46
5.2.2.Teste de torção e distorção	46
5.3.Avaliação dos limites de fabricação de cabos metálicos.....	47
6.RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
6.1.Trefilação úmida.....	49
6.1.1.Conjunto de fieiras de trefilação.....	49
6.1.2.Rota de redução de diâmetro do fio.....	51
6.1.3.Velocidade de produção	55
6.2.Capacidade dos fios de aço em formar cabos metálicos	57
6.2.1.Teste de torção simples.....	57
6.2.2.Teste de torção-distorção.....	62
6.2.3.Análise das rupturas provenientes dos testes de torção simples.....	62
6.3.Avaliação dos limites de fabricação dos cabos metálicos	65
7.CONCLUSÃO.....	67
ANEXO	73

1. INTRODUÇÃO

Os reforços metálicos destinados aos pneumáticos são fabricados a partir da união da borracha com cabos metálicos, também chamados de “cordas de aço”, que são constituídos por fios de aço trefilados originários de siderúrgicas (ArcelorMittal, Monlevade, etc).

O processo de trefilação é uma etapa de transformação do fio que tem por objetivo submetê-lo a uma redução de diâmetro que irá modificar suas propriedades físicas e químicas. Ele consiste em tracionar o fio de aço latonado através de um cabrestante motorizado, fazendo-o passar por uma série de fieiras as quais irão lhe impor uma deformação plástica. A passagem do fio através das fieiras gera modificações profundas na microestrutura do aço, tensões residuais em diferentes escalas e uma diversidade de heterogeneidades e, ou defeitos presentes na superfície e, ou no interior do material. Estas modificações estão intimamente relacionadas à resistência mecânica do material, à porcentagem de carbono presente na microestrutura do aço utilizado e à rota de redução de diâmetro utilizada no processo de trefilação do fio.

Atualmente o segmento de fabricação de pneumáticos visa à diminuição do peso dos pneus a partir do aperfeiçoamento da resistência ao rolamento que está ligado à redução no consumo de combustível pelos veículos. Sendo assim, para alcançar essa meta, busca-se a utilização de reforços metálicos constituídos de fios de aço de maior resistência mecânica, denominados fios de aço UHT – *Ultra High Tensile*.

Para o desenvolvimento de produtos e processos capazes de atender as exigências desses reforços metálicos, é necessário avaliar a capacidade dos fios de aço UHT em formar cabos metálicos, já que, estes fios apresentam propriedades dimensionais diferenciadas e propriedades mecânicas melhores em relação aos fios de aço empregados atualmente nos pneus.

Este trabalho é direcionado à optimização do desempenho dos reforços metálicos empregados em pneumáticos e à evolução dos processos de fabricação destes reforços. Ele está associado à avaliação, sobre uma análise mecânica, dos atuais limites dos processos de trefilação úmida e de fabricação de cabos de aço, determinando a influência dos parâmetros do processo sobre a produção de fios de aço e cabos metálicos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Os pneumáticos

2.1.1. Panorama da produção de pneus

Desde sua origem, no século XIX, o pneu passou por muitas mudanças e melhorias tecnológicas que o levaram a apresentar as diversas características e funções conhecidas atualmente. Essa evolução tecnológica teve início em 1841 com a descoberta e registro do processo de vulcanização da borracha por Charles Goodyear [1], dando início a uma nova era na utilização desse material. Anos mais tarde, os irmãos Edouard e André Michelin inovaram com a criação do primeiro pneu de bicicleta desmontável em 1891 e em seguida com o primeiro pneu para automóveis.

Nos dias de hoje, mais da metade da produção mundial de pneus (53,5%) está dividida entre as seis principais empresas: Bridgestone (15,3%), Michelin (14,0%), Goodyear (10,1%), Continental (5,8%), Pirelli (4,2%) e Sumitomo (4,1%). A Figura 2.1 ilustra a participação das empresas no mercado mundial de produção de pneumáticos [2].

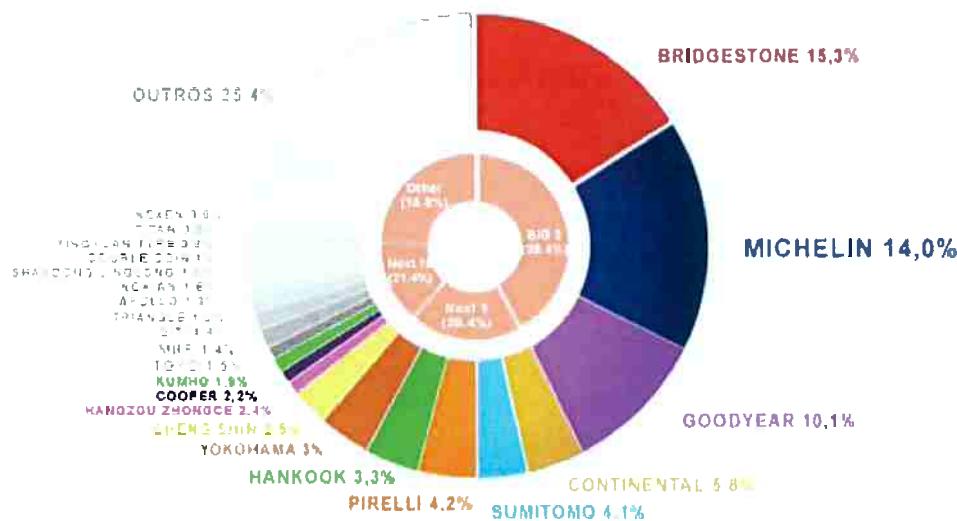


Figura 2.1 – Distribuição da produção mundial de pneus em 2012 [2].

No Brasil, desde 1960 a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP) é responsável por representar a indústria de pneus e câmaras de ar instalada no Brasil, compreendendo nove empresas e quinze fábricas instaladas nos Estados de São Paulo (sete), Rio de Janeiro (duas), Rio Grande do Sul (duas), Bahia (três) e Paraná (uma). Ao todo a ANIP responde por 21 mil empregos diretos e 100 mil indiretos. O setor é apoiado por uma rede com mais de 4.500 pontos de venda no Brasil que emprega mais de 40 mil pessoas [3].

A Figura 2.2 representa a produção brasileira de unidades de pneus em 2012, correspondente às dez empresas associadas à ANIP: Bridgestone, Michelin, Continental, Pirelli, Levorin, Maggion, Titan, Tortuga e Rinaldi. Juntas, elas produziram cerca de 62,6 milhões de unidades.



Figura 2.2 – Indústria Brasileira de pneus em 2012 [3].

Considerando o aumento gradativo da fabricação e do uso de pneus no Brasil, as empresas associadas à ANIP resolveram atuar em conjunto para cumprir as metas da Resolução Conama 258/99 [4] e implantar um programa de coleta e destinação adequada de pneus que são inaptos para uso veicular, ou seja, que não exercem mais as suas funções.

Esta resolução foi deliberada, pois os pneus são resíduos de difícil eliminação, não biodegradáveis e seu volume torna o transporte e o armazenamento complicados. Além disso, mesmo não sendo considerados perigosos, durante sua queima são liberadas substâncias tóxicas e cancerígenas, como dioxinas e furanos, e quando são dispostos em locais abertos ou não adequados acumulam água e servem como criatório para mosquitos transmissores de doenças tropicais. As milhares de carcaças abandonadas no Brasil são uma das principais causas da proliferação da dengue [5].

Após o recolhimento, os pneus são utilizados em atividades determinadas pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA) e dos Recursos Naturais Renováveis como “destinos ecologicamente corretos”¹. Porém ainda existe uma grande dificuldade por parte dos fabricantes em coletar estes pneus, restando então o desafio pela procura de meios e métodos eficazes para reutilização do pneumático e dos materiais presentes em sua estrutura.

2.1.2. Estrutura e função

O pneu, elemento essencial para a mobilidade, é um elemento de enorme importância nos veículos, pois ele é o único ponto de contato entre o veículo e o solo. Sua função é alcançar o equilíbrio adequado entre aderência, tração, conforto, duração, eficiência energética e custo. Por este motivo, são necessárias diversas tecnologias de ponta para que um pneu ofereça as condições adequadas e compatíveis a um ótimo desempenho, em qualquer tipo de solo [6].

Simples na sua aparência, em anel de borracha, alguns pneus possuem até 200 componentes diferentes, utilizando-se uma ampla variedade de matérias-primas. Os diferentes componentes do pneu podem se agrupar em quatro grupos: elastômeros, cargas de reforço, plastificantes e reforços metálicos e têxteis.

¹ *Transformação do pneu em lâminas para posterior fabricação de outros produtos; utilização da borracha do pneu para aplicação em asfalto e produção de artefatos de borracha; picotagem do pneu para utilização em artefatos de concreto, em substituição à brita; utilização como combustível, em substituição ao carvão e ao coque.*

Elastômeros

- Borracha natural: o principal componente da banda de rolamento dos pneus. Permite reduzir o aquecimento interno do pneu durante sua utilização visando uma resistência mecânica elevada.
- Borracha sintética: elemento essencial na escultura dos pneus para carros, veículos comerciais e 4x4. Ela é fabricada a partir de hidrocarbonetos derivados do petróleo e sob o efeito de tensões, deforma-se e retorna à sua forma inicial somente com a retirada das tensões. Essa última característica é interessante para a fabricação de pneus mais aderentes. Além disso, a borracha sintética fornece outras propriedades específicas ligadas à longevidade do pneu e à sua resistência ao rolamento.

Cargas de reforço

- Negro de fumo: usado para aumentar a resistência ao desgaste do pneu. Ele representa de 25 a 30% da composição da borracha e confere ao pneu sua coloração preta a qual apresenta um real poder contra a radiação ultravioleta, evitando assim o aparecimento de fissuras e a degradação da borracha.
- Silica: permite uma melhora das propriedades de durabilidade do pneu. Sua utilização também diminui a resistência do pneu ao rolamento e lhe confere uma boa aderência sobre o solo frio.

Plastificantes e outros elementos químicos

- Enxofre: é o agente da vulcanização. Faz com que a borracha evolua a um estado elástico, o que cria uma estrutura composta entre todos os elementos do pneu. A vulcanização se realiza em prensas especiais utilizando a ação combinada do calor e da pressão. O enxofre, acompanhado de produtos retardantes aperfeiçoam a ação do calor sobre o pneu no momento de seu cozimento.
- Óleos, resinas e produtos químicos: dão aos pneus algumas propriedades específicas como a menor resistência ao rolamento ou a extraordinária aderência.

Reforços metálicos e têxteis

Além da utilização de misturas de borracha o pneu necessita de reforços metálicos e têxteis. Compondo o esqueleto do pneu, eles garantem sua geometria e sua rigidez. Também

são responsáveis por garantir a flexibilidade indispensável do pneu durante seu contato com o solo.

- Filamentos metálicos: conferem resistência e rigidez ao pneu. São fabricados a partir do aço.
- Filamentos têxteis: conferem força, resistência e conforto ao pneu. São fabricados utilizando poliéster, nylon e aramida.

Todos esses diferentes componentes do pneu irão compor uma arquitetura complexa que o permite responder da melhor maneira às expectativas dos clientes. Suas principais funções são: guiar o veículo, suportar a carga, amortecer o impacto com o solo e permitir o rolamento. Estas funções são asseguradas em grande parte pela contribuição dos reforços metálicos que estão presentes nas seguintes estruturas do pneu: aro de talão e lonas de topo. A Figura 2.3 representa um corte de pneu, com seus demais elementos e respectivas funções:



Figura 2.3 – Estrutura de um pneu [6].

1) Revestimento Interno

Uma camada de borracha sintética hermética ao ar. Ela se encontra no interior do pneu e substitui a antiga câmara de ar.

2) Carcaça

A carcaça é uma estrutura flexível formada por fios têxteis embutidos em borracha, que formam arcos retos e se enrolam no aro do talão do pneu. Sobre a carcaça se colocam as demais lonas e capas de borracha que formam o pneu. Suas funções são:

- Suportar a carga e a velocidade com ajuda da pressão dentro do pneu;

- Participar na estabilidade e no conforto;
- Participar no rendimento e na eficiência energética do pneu.

3) Zona Baixa

Seu papel é transmitir a potência do motor do veículo na aceleração e na frenagem, desde a roda até a área de contato com o solo.

4) Aro do Talão

É a parte do pneu que o conecta e se ajusta à roda. O aro do talão é formado por um cabo de aço inextensível de onde se enrola a lona da carcaça. O aro pode suportar até 1800 kg sem risco de ruptura. Suas funções são:

- Fixar o pneu na roda;
- Vedar o pneu;
- Transmitir a potência do motor do veículo nos esforços de aceleração e frenagem.

5) Flanco Externo

O flanco é a região compreendida entre a banda de rodagem e os talões do pneu. As informações sobre as características do pneu podem ser encontradas no flanco externo. Ele representa a altura do pneu e suas funções são:

- Suportar a carga;
- Suportar as constantes flexões mecânicas;
- Oferecer resistência às agressões;
- Participar na estabilidade e no conforto.

6) e 7) Lonas de Topo

O revestimento é feito de cabos de aço conectados à borracha que se posicionam sobre a carcaça formando um cinturão com a função de garantir a resistência mecânica do pneu à velocidade e à força centrífuga. As lonas que formam o cinturão cruzam-se obliquamente e se posicionam uma sobre a outra. O cruzamento dos fios das lonas com os da carcaça formam triângulos indeformáveis que asseguram a rigidez do bloco de topo. Essas capas possuem um papel muito complexo, pois devem ser bastante rígidas em dois aspectos:

- No sentido da circunferência do pneu: para não sofrerem deformação causada pela força centrífuga e para controlar perfeitamente o diâmetro do pneu, independentemente das condições de uso;
- No sentido transversal: para resistir aos esforços de deriva. Porém, ao mesmo tempo, também precisam ser muito flexíveis no sentido vertical para absorver o impacto ao passar por obstáculos.

8) Banda de Rodagem

É a parte do pneu que fica em contato direto com o solo e é formada por uma camada de borracha constituída por uma série de ranhuras, as quais dão origem ao desenho da escultura do pneu. Suas funções são:

- Dar aderência em solo seco e molhado;
- Dar durabilidade e resistência ao desgaste e às agressões;
- Participar na baixa resistência ao rolamento;
- Participar no conforto acústico (sonoridade em rodagem);
- Proporcionar maior controle do veículo e conforto ao dirigir.

Cada um dos componentes do pneu, separadamente, exerce uma influência sobre as características finais do produto. Porém, para obter o melhor desempenho é preciso analisar e considerar o impacto do conjunto das propriedades fornecidas por cada elemento no pneu. Esse fato torna o processo de fabricação de pneus muito mais complexo.

2.1.3. Tipos de pneu: pneu convencional e pneu radial

A principal diferença entre esses tipos de pneu é a sua estrutura que é ilustrada para o pneu convencional na Figura 2.4 e para o pneu radial na Figura 2.5. Enquanto no pneu convencional a carcaça é composta por lonas de tecido sobrepostas de modo cruzado umas em relação às outras, no pneu radial a carcaça é composta por cabos metálicos, dispostas em paralelo, na direção radial do pneu [7].

Sendo assim, o pneu convencional não apresenta cabos de aço estabilizadores, que reduzem a movimentação interna do pneu. Dessa maneira, o pneu todo tende a inclinar-se durante as curvas, diminuindo a segurança do veículo. Já no segundo modelo, a estrutura é estabilizada por três ou quatro lonas de topo formadas por cabos de aço, dispostas sob a banda de rodagem. Isto faz com que o pneu radial seja mais flexível na lateral e mais aderente ao solo, ao mesmo tempo em que garante maior estabilidade, durabilidade e tração ao veículo. Por isso, podemos considerar que os pneus radiais oferecem também mais segurança para o veículo [7].

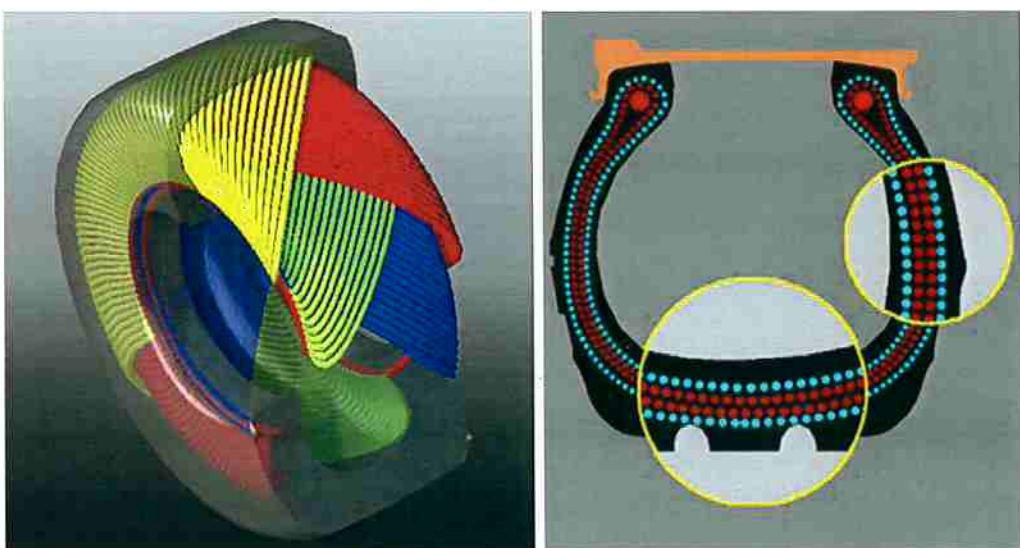


Figura 2.4 – Exemplo de estrutura de um pneu convencional [8].

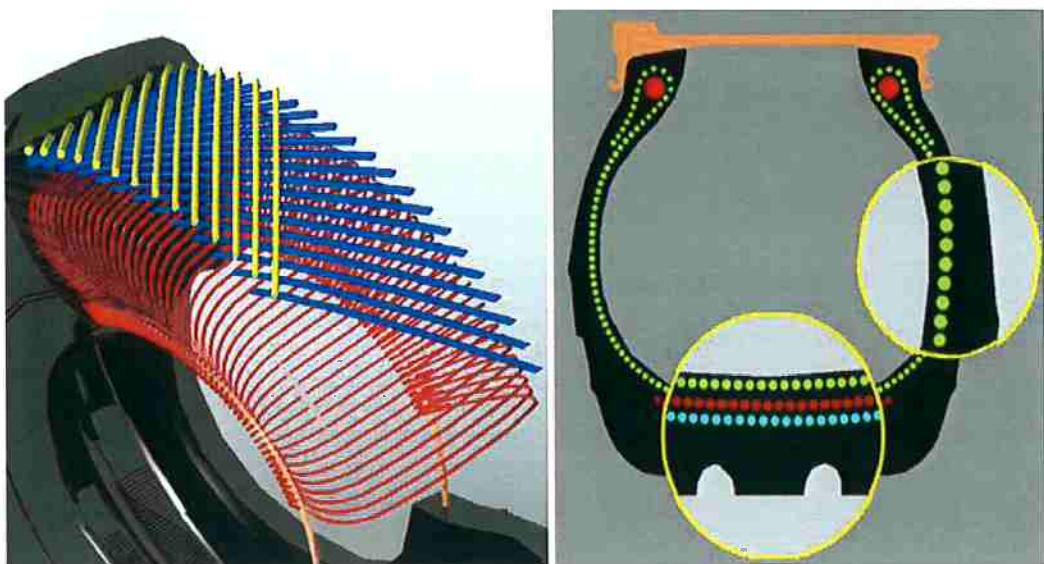


Figura 2.5 – Exemplo de estrutura de pneu radial [8].

2.1.4. Processo de fabricação

O processo de fabricação de pneus alia diversas exigências relacionadas ao desempenho, à qualidade e à segurança do produto que estão diretamente ligados a uma alta tecnologia. Para a obtenção de altos níveis de excelência, as várias etapas de fabricação seguem um processo rigoroso e metódico associado a um controle de qualidade contínuo em todas as etapas [9] detalhadas abaixo:

- Preparação: são utilizados mais de 200 componentes para fabricar o pneu, entre eles as matérias primas e os produtos semi-acabados;
- Montagem: confecção e acabamento do pneu;
- Vulcanização: confere ao pneu sua forma e aspecto final;
- Controle de qualidade: permitem assegurar a conformidade dos processos de fabricação com as exigências de qualidade da empresa. Após a vulcanização, antes da expedição, o pneu pode passar por várias verificações: visuais, radiografia, ultrassom, uniformidade e arquitetura.

Neste trabalho serão detalhados os processos de fabricação de reforços metálicos utilizados nas lonas de topo de pneus radiais destinados às categorias veículos de passeio, veículos pesados (caminhões e ônibus) e para engenharia civil.

2.2. Os reforços metálicos no pneu

Atualmente, no contexto de desenvolvimento de pneumáticos cada vez mais tecnológicos, o objetivo maior é diminuir a resistência do pneu ao rolamento e consequentemente gerar uma redução no consumo de combustível pelo veículo. Este objetivo pode ser atingido através da diminuição do peso dos reforços metálicos utilizados, aumentando, portanto sua resistência mecânica e modificando a estrutura e/ou propriedades dos cabos metálicos utilizados. Na Figura 2.6 está representada a classificação dos fios de aço em função de sua resistência mecânica e diâmetro. Os domínios destacados estão organizados em ordem crescente de resistência mecânica: *Normal Tensile* (NT), *High Tensile* (HT), *Super High Tensile* (SHT), *Ultra High Tensile* (UHT) e *Mega Tensile* (MT).

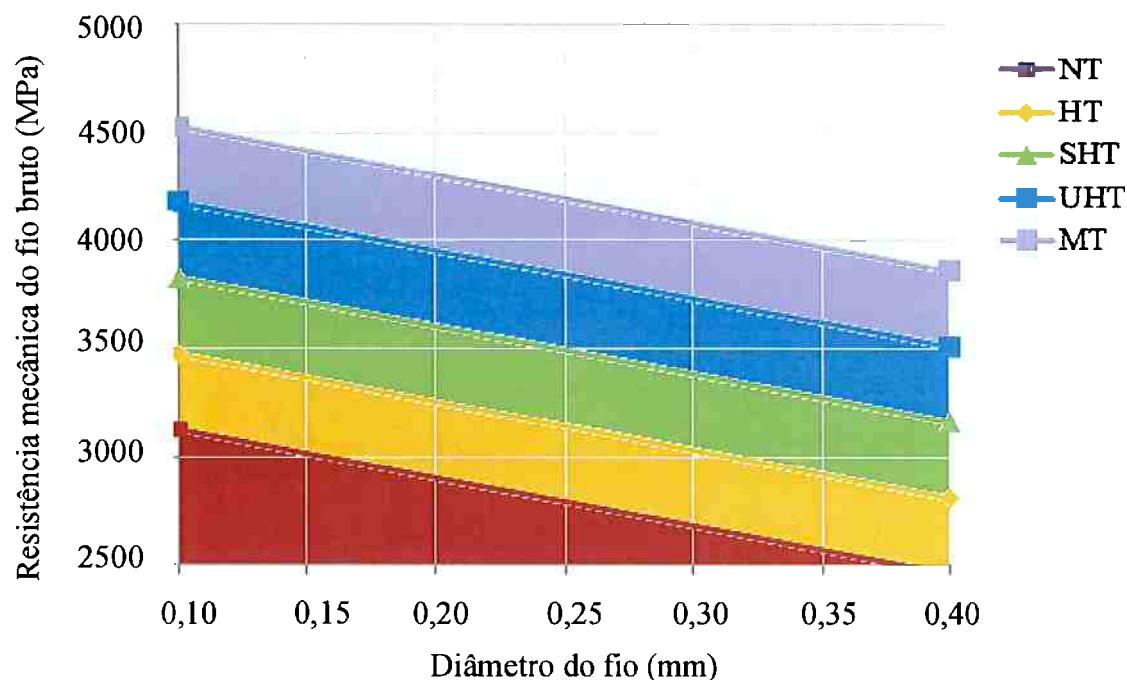


Figura 2.6 – Classificação dos domínios de resistência mecânica pela Michelin.

A elaboração dos cabos de aço é realizada em diversas etapas e até serem formados, os fios que os compõe passam por diversos processos que estão esquematizados na Figura 2.7. A matéria prima correspondente a este processo é o fio máquina, um fio de aço com diâmetro inicial de 5,5 mm fornecido pela siderúrgica.

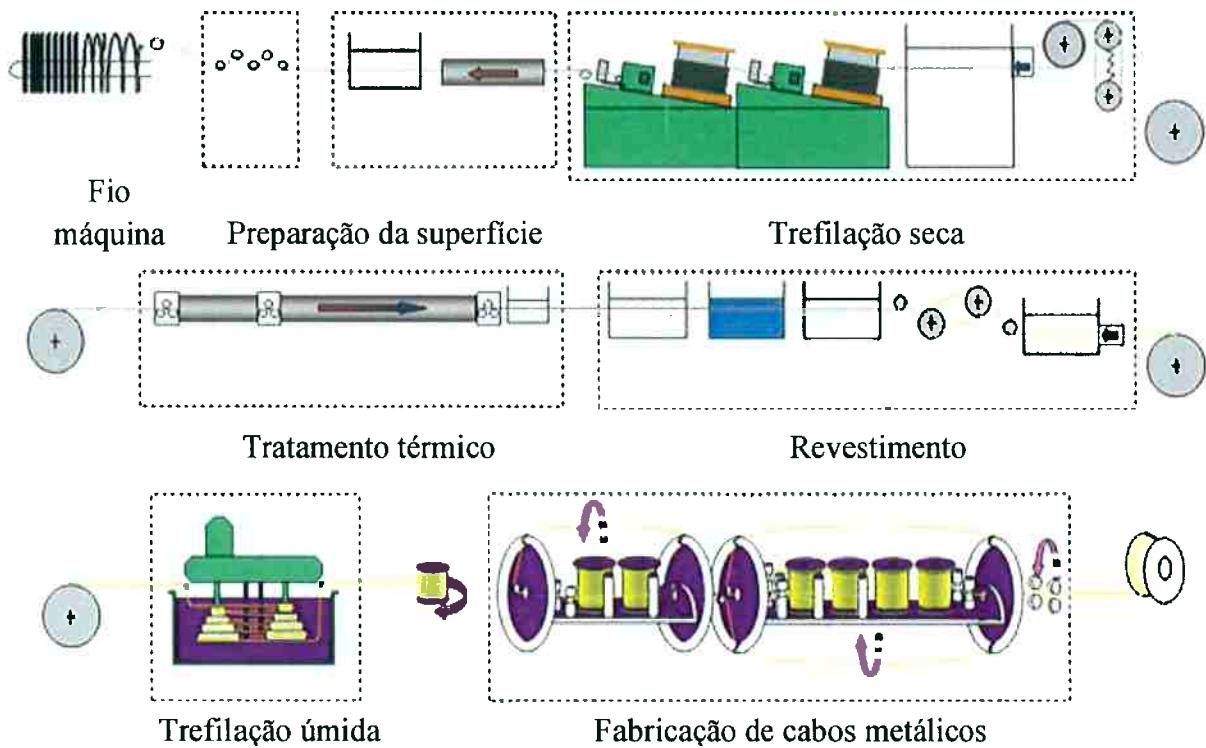


Figura 2.7 – Processo de transformação de fios de aço em reforços metálicos para pneus.

Adaptado de [10].

As diversas etapas deste processo de obtenção de cabos metálicos são descritas a seguir, na ordem em que aparecem no processo.

Decapagem: Preparação da superfície do fio

Etapa necessária na preparação da superfície do fio para a etapa seguinte de trefilação seca, pois elimina mecanicamente a camada de óxidos presente no fio e melhora a adesão dos tensoativos usados durante a trefilação.

Trefilação seca: Redução do diâmetro do fio

Nesta etapa o fio terá seu diâmetro reduzido de 5,5mm até diâmetros entre 2,15 mm e 1,3 mm. Esta redução é obtida através da deformação plástica à qual o material é submetido. Ela permitirá um aumento da resistência mecânica do material e uma diminuição de sua ductilidade. Essa deformação causa impactos nas propriedades mecânicas no interior e na superfície do fio.

Tratamento térmico: Reorganização da estrutura do material

Após as etapas de deformação a frio, preparação da superfície e trefilação seca, o metal apresenta um grande número de defeitos cristalinos pontuais e de discordâncias que lhe conferem uma resistência mecânica maior que a do fio máquina e uma ductilidade menor que a inicial. Sendo assim, o tipo de tratamento térmico realizado é responsável pelas características microestruturais que o fio irá assumir. Portanto, esta etapa permite a reorganização da microestrutura inicial do fio contribuindo para o aumento da ductilidade do material que fora perdida durante a trefilação seca. O tratamento térmico visa a obtenção de uma microestrutura majoritariamente perlítica.

A estrutura perlítica é formada pela alternância entre lamelas monocristalinas de ferrita e de cementita que são formadas ao longo do resfriamento do aço a partir das transformações de fase que podem ser analisadas através do diagrama de equilíbrio de ferro-carbono (Figura 2.8). As lamelas de perlita que irão constituir o material analisado neste trabalho se reagrupam em diferentes colônias que inicialmente possuem distâncias interlamelares da ordem de 150 nm e que não apresentam orientação cristalográfica privilegiada [11].

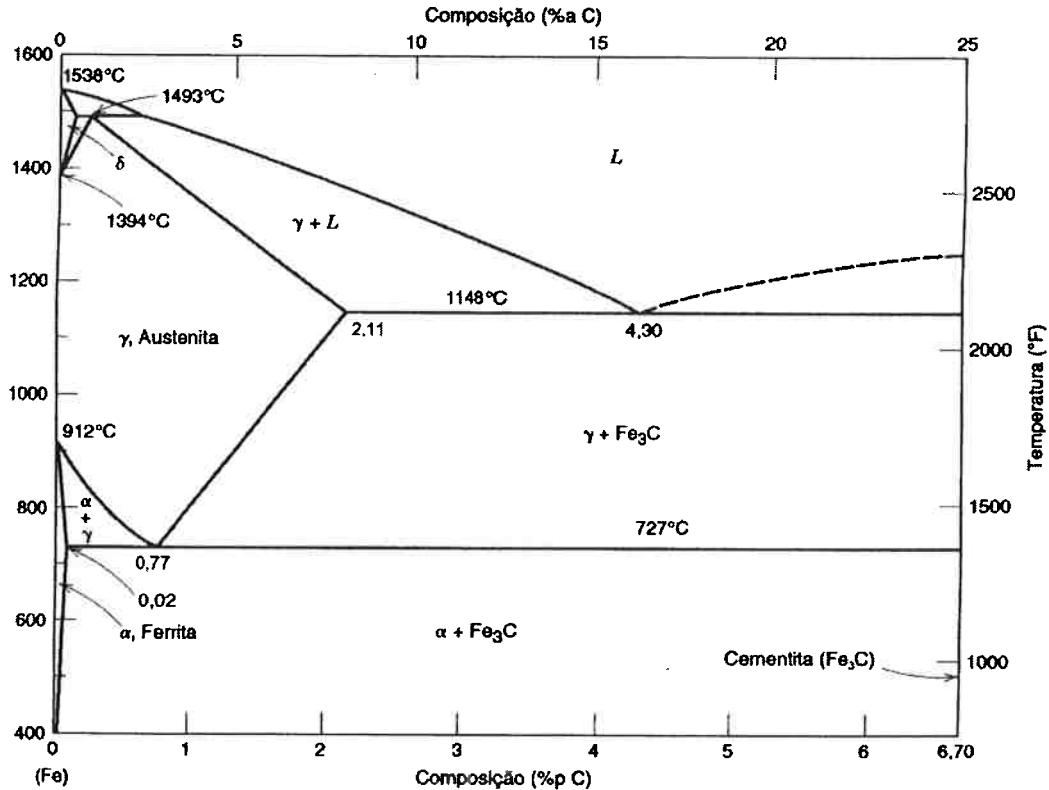


Figura 2.8 – Diagrama de fases ferro – carbono.

Os aços possivelmente utilizados apresentam teores de carbono entre 0,88% e 1%, por isso, são considerados aços de alto teor de carbono. Quando são submetidos a um tratamento térmico específico, esses aços podem ser denominados aços patenteados e eles possuem propriedades mecânicas excepcionais determinadas pelas características da microestrutura formada, pelos tamanhos de grão do material e pela distância interlamelar das perlitas. O processo de patenteamento do aço consiste na realização de um tratamento térmico visando a obtenção de uma microestrutura composta por perlitas lamelares extremamente finas que possibilitam o melhor compromisso entre alta resistência à tração e ductibilidade elevada [12], a fim de permitir que os fios sofram as severas operações de trefilação e ainda assim apresentem as características mecânicas desejadas [13].

Este tratamento térmico é efetuado através de uma transformação em resfriamento contínuo (*Continuous Cooling Transformation* – CCT). O fio é aquecido por efeito Joule até atingir a sua temperatura de austenitização, entre 900°C e 1000°C, em seguida ele é resfriado de maneira controlada para obter-se a estrutura perlítica desejada. A Figura 2.9 ilustra o forno utilizado para este tratamento.

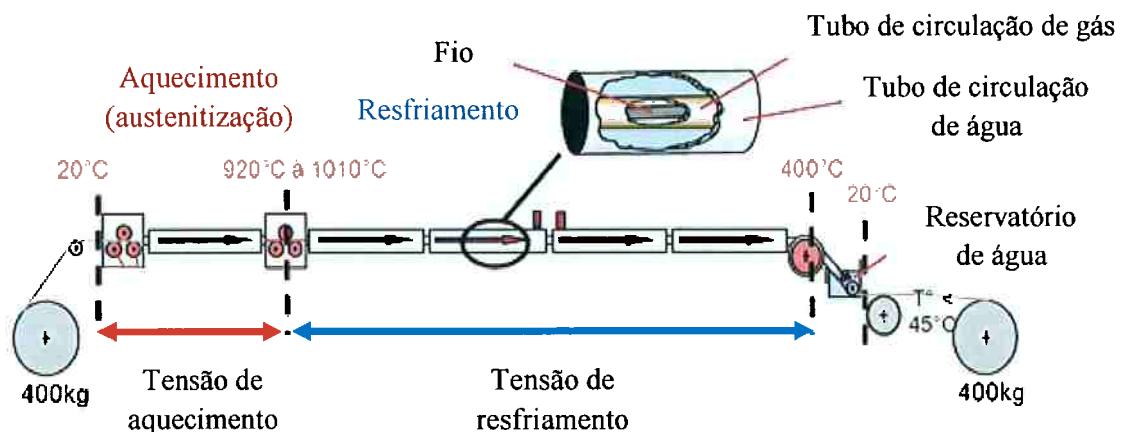


Figura 2.9 – Esquema de uma linha de tratamento térmico. Adaptado de [10].

O forno empregado é em forma de tubo e está dividido em duas partes: o aquecimento do fio e o seu resfriamento. A temperatura de austenitização é controlada pela tensão de aquecimento que gera uma corrente de aquecimento do fio. A velocidade de resfriamento é controlada pelo diâmetro dos tubos “*water jacket*” que constituem o forno.

Este forno é formado por duas tubulações. A mais interna mantém o fio aquecido em uma atmosfera composta unicamente por hidrogênio que atua como fluido refrigerante ou portador de calor, além de evitar que o material se oxide e eliminar quaisquer resíduos do lubrificante utilizado na trefilação seca, e a segunda tubulação, mais externa, contém água fria que será encarregada de resfriar o hidrogênio. O ciclo térmico dentro do forno apresenta o perfil indicado na Figura 2.10.

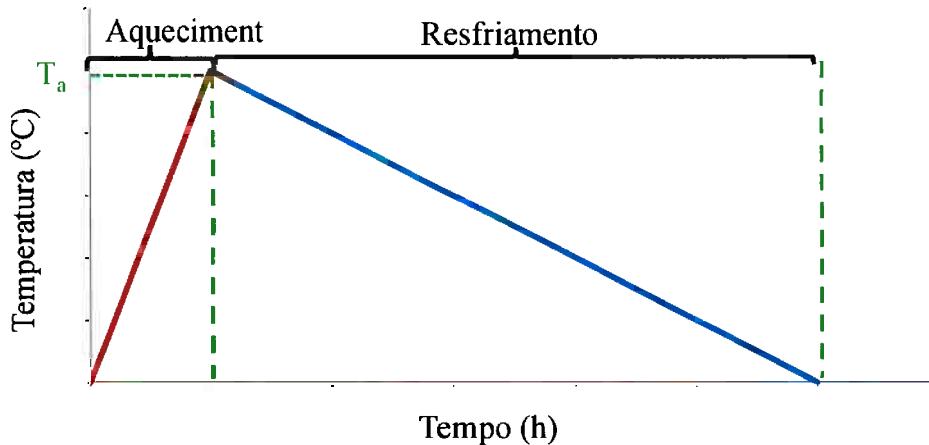


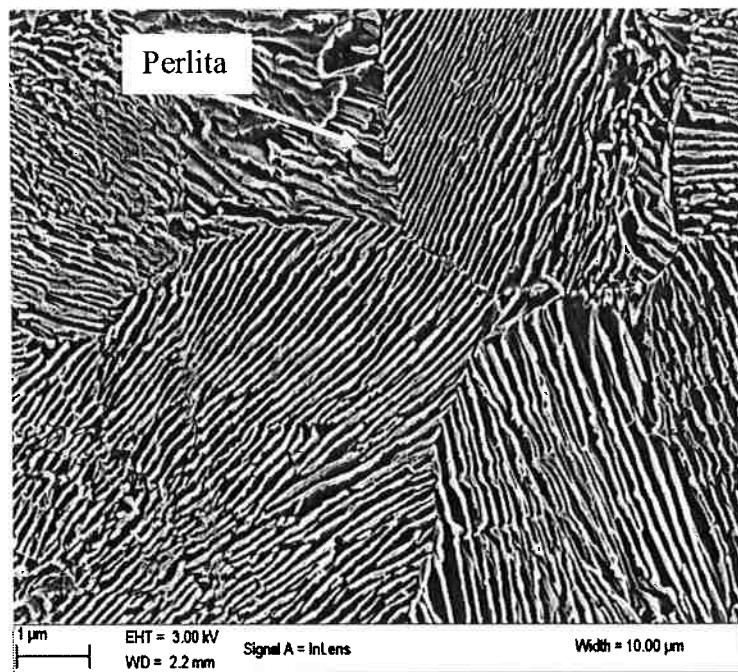
Figura 2.10 – Ciclo térmico empregado no tratamento térmico dos fios de aço. Adaptado de [10].

O controle da velocidade de resfriamento do fio determina a distância interlamelar das perlitas, ou seja, quanto mais rápido o resfriamento, mais finas serão as perlitas formadas, e, portanto maior será a resistência mecânica apresentada pelo fio [10].

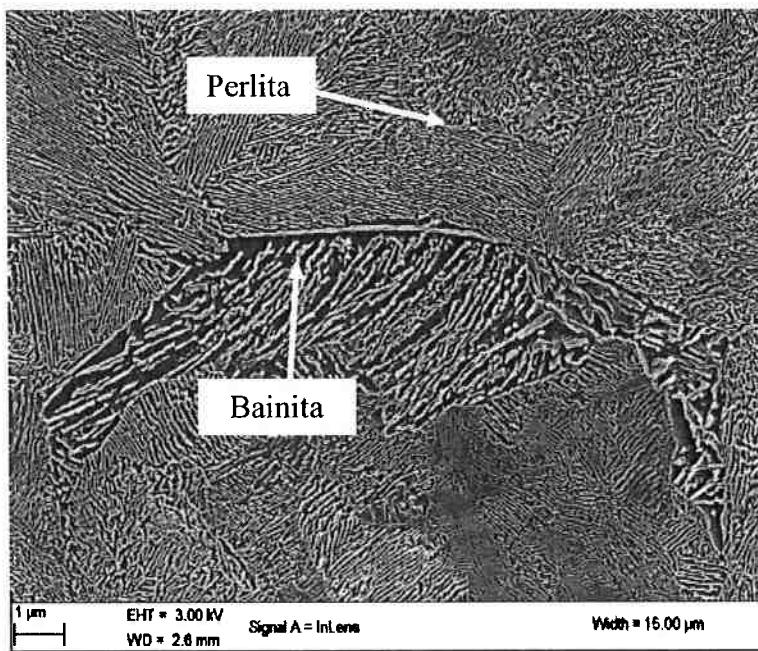
Durante o resfriamento desses aços alto carbono também ocorre a formação da cementita proeutetóide que se localiza nos contornos de grão da austenita e mais tarde, em volta das colônias de perlita. Por ser uma fase dura e frágil, a cementita é responsável por conferir ao aço um aumento de sua dureza e da resistência mecânica em detrimento de sua ductibilidade e da capacidade do material em deformar-se, devido à presença de decoesões situadas proximamente da cementita.

Contudo, após o tratamento térmico realizado, em comparação com as propriedades iniciais, o material possui maior capacidade em deformar-se e maior resistência.

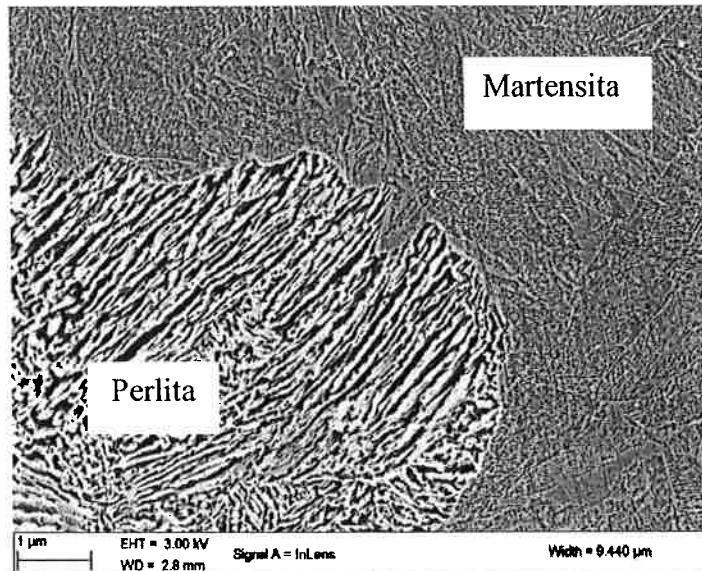
Nos casos em que o tratamento térmico não é corretamente realizado, podem ser obtidas microestruturas não desejadas, como a bainita e a martensita, que estão ilustradas na Figura 2.11.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.11 – Exemplos de microestruturas de aços alto carbono (a) perlita, (b) matriz perlítica e bainita, (c) matriz perlítica e martensita.

Revestimento: deposição superficial de liga de cobre-zinco

Após o tratamento térmico, os fios de aço são conduzidos, sob a forma de bobinas, para a linha de revestimento a fim de receberem uma camada de latão em sua superfície. Este procedimento é caracterizado pela preparação da superfície do fio em um banho de ácido sulfúrico seguido da deposição de cobre e zinco, separadamente, por eletrólise. No fim destas etapas, o fio é aquecido por efeito Joule para que possa haver a interdifusão entre os átomos dos dois materiais e que sejam formadas as diferentes fases de Cu e Zn que caracterizam o latão.

Após seu revestimento, o fio está pronto para a próxima etapa de trefilação úmida. O revestimento tem por objetivo facilitar a etapa de trefilação úmida e garantir uma boa aderência entre o fio e a borracha quando constituírem as lonas do pneu.

Trefilação úmida: Redução do diâmetro do fio

A etapa de trefilação úmida consiste na redução do diâmetro do fio através de sua passagem por fieiras e cabrestantes imersos num banho de lubrificante. Esse lubrificante irá facilitar o processo de trefilação, pois evita que o fio sofra um aquecimento muito grande que

possa provocar uma modificação da microestrutura do material. Para manter a temperatura do banho estável, um sistema de refrigeração é utilizado.

Ao longo da trefilação, a microestrutura do aço passa por uma evolução complexa [14]. Sendo assim, as colônias de perlita se alinham progressivamente na direção de trefilação e a distância interlamelar diminui, gerando uma estrutura nanométrica formada por duas fases instáveis [14] [15] [16] [17]. Para ilustrar a etapa anterior e posterior da deformação de um fio de aço durante a trefilação, tem-se a Figura 2.12.

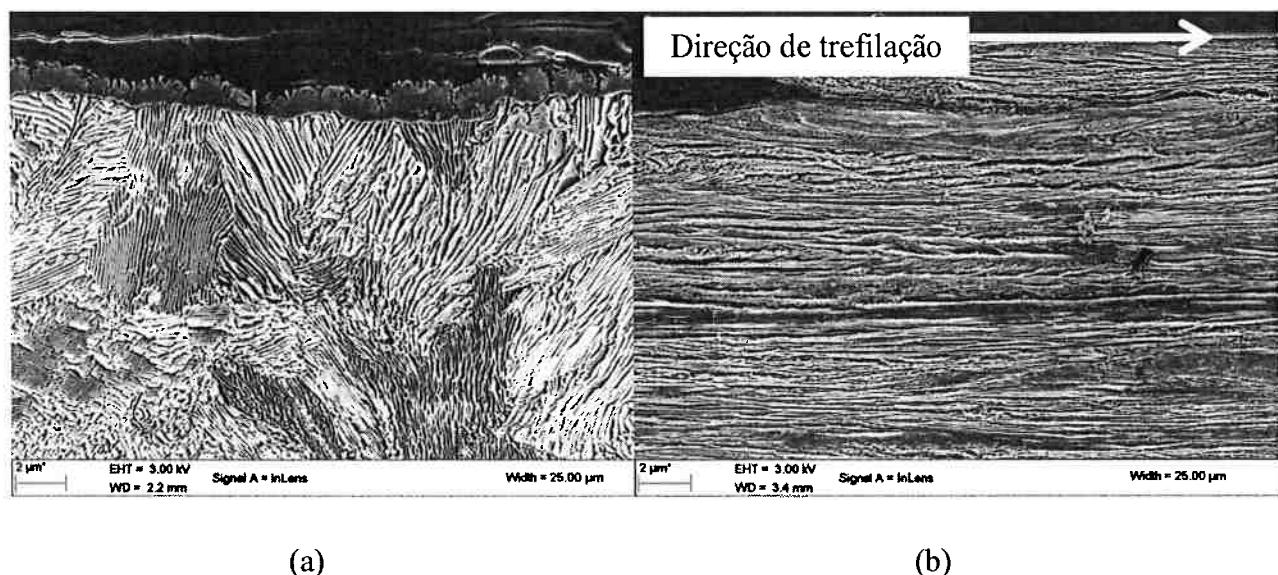


Figura 2.12 – Observação ao MEV da microestrutura perlítica lamelar de fios de aço atacados ao nital à 1% (a) após passagem pela primeira fieira e (b) na saída da trefilação seca.

Depois de trefilados, os fios irão constituir os cabos de aço. As propriedades mecânicas esperadas do fio para a formação desses cabos incluem a capacidade do fio em submeter-se às solicitações de torção, flexão e tração.

Fabricação de reforços metálicos: Fios trefilados formam os cabos metálicos

Os cabos metálicos são fabricados a partir de fios de aço, enrolados em forma helicoidal, de altíssima resistência (entre 3000 e 4000 MPa) cujos aspectos críticos são: o controle da morfologia, a composição química e o baixo teor de inclusões não-metálicas [18]. Os cabos metálicos formados podem ser constituídos de 2 a 210 fios de aço. Ao longo deste procedimento de fabricação as propriedades mecânicas e estruturais dos fios são colocadas em evidência, pois os fios são submetidos a diferentes solicitações simultaneamente.

Os cabos metálicos então produzidos serão inseridos entre duas camadas de borrachas pelo procedimento chamado calandragem, formando as lonas de topo que serão aplicadas diretamente nos pneus.

Como este trabalho irá tratar essencialmente dos processos de trefilação úmida e de fabricação de cabos de aço, essas duas etapas serão detalhadas a seguir.

2.3. Trefilação úmida

2.3.1. Microestrutura do material

Como mencionado anteriormente, o fio trefilado apresentará uma microestrutura formada por perlitas lamelares muito finas, que apresentam distâncias interlamelares da ordem de nanômetros. A Figura 2.13 mostra as medidas de distância interlamelar obtidas por Tashiro [19] em um aço de microestrutura perlítica trefilado em diferentes diâmetros. Os resultados demonstram uma dependência linear entre a distância interlamelar e o diâmetro final do fio trefilado [20].

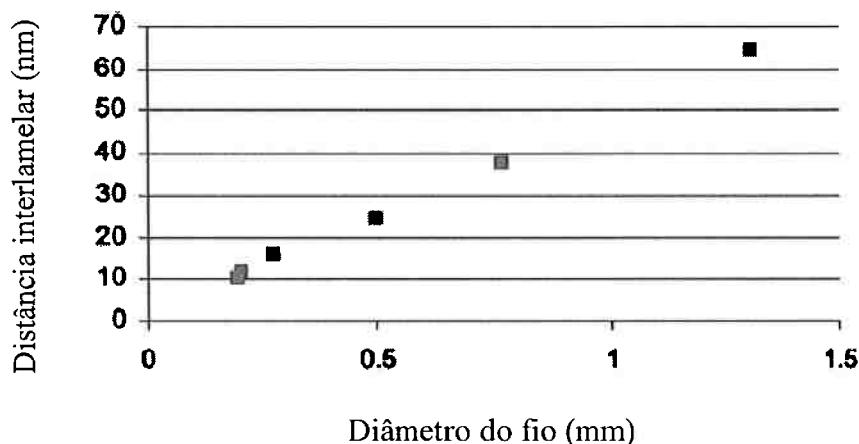


Figura 2.13 – Distância interlamelar da perlita em função do diâmetro do fio de aço [19] [20].

A trefilação úmida é uma operação de deformação plástica realizada a frio que é acompanhada do aumento da resistência mecânica do aço e que se explica pela criação de defeitos no material responsáveis por limitar o movimento das discordâncias. Este fenômeno é chamado encruamento.

O limite de elasticidade e a resistência mecânica do material são ligados à sua composição química (elementos químicos, presença de defeitos, natureza da ligação química, etc), ao tratamento térmico pelo qual o fio é submetido (características dos grãos e das fases formadas), assim como a densidade de discordâncias e seu movimento. A Figura 2.14 ilustra uma curva de encruamento do fio.

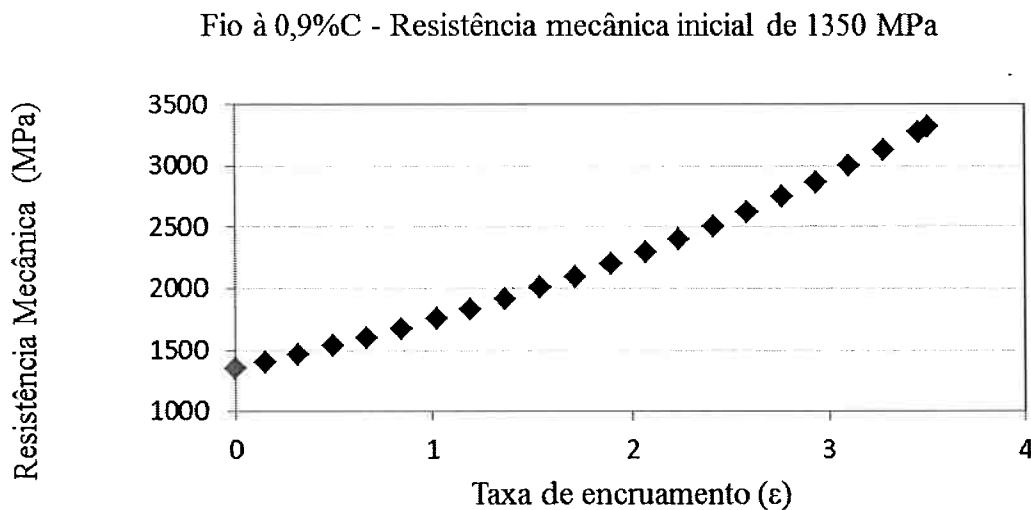


Figura 2.14 – Curva de encruamento do fio de aço à 0,9% em massa de carbono.

A resistência mecânica do aço pode ser obtida através de uma relação estabelecida por Hall-Petch [21] [22] [23] que foi matematicamente desenvolvida para aços contendo alto teor de carbono e pode ser representada pela equação a seguir:

$$Rm = Rm_0 e^{(\epsilon/k)} \quad (1)$$

Rm (MPa) : Resistência Mecânica após trefilação

Rm_0 (MPa): Resistência Mecânica antes da trefilação

ϵ : Taxa de encruamento

k : Coeficiente de encruamento que depende da microestrutura do aço. Determinado experimentalmente, podendo assumir valores entre 3,7 e 4,2.

O encruamento do fio apresentado na Figura 2.14 é resultado da evolução da microestrutura do material ao longo da deformação plástica a frio ocorrida ao longo do processo de trefilação. O fenômeno do encruamento é explicado com base em interações entre campos de deformações de discordâncias.

A densidade de discordâncias em um metal aumenta com a deformação, devido à multiplicação delas ou à formação de novas discordâncias. Como consequência, a distância média de separação entre as discordâncias diminui: as discordâncias são posicionadas mais

próximas entre si. Em média, as interações de deformação discordância-discordância são repulsivas. O resultado global é tal que o movimento de uma discordância é dificultado pela presença de outras discordâncias. À medida em que a densidade de discordâncias aumenta, esta resistência ao movimento de discordância por outras discordâncias se torna mais pronunciada. Assim a tensão imposta necessária para deformar um metal aumenta com o aumento do trabalho a frio [24].

Durante a trefilação, a deformação plástica a qual o fio é submetido conduz à evolução progressiva de suas propriedades mecânicas. A resistência mecânica e o limite de elasticidade dos fios de aço aumentam e o alongamento à ruptura diminui. A Figura 2.15 ilustra uma fieira e suas principais partes, geralmente constituída por um núcleo de diamante ou de tungstênio ligado ao cobalto, inserida numa armação metálica [25]. A taxa de encruamento do material ε depende da redução do diâmetro do fio durante a passagem através da fieira e é dada pela equação seguinte:

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{D_0}{D_f} \right) \quad (2)$$

D_0 (mm): diâmetro inicial do fio

D_f (mm): diâmetro final do fio (após trefilação)

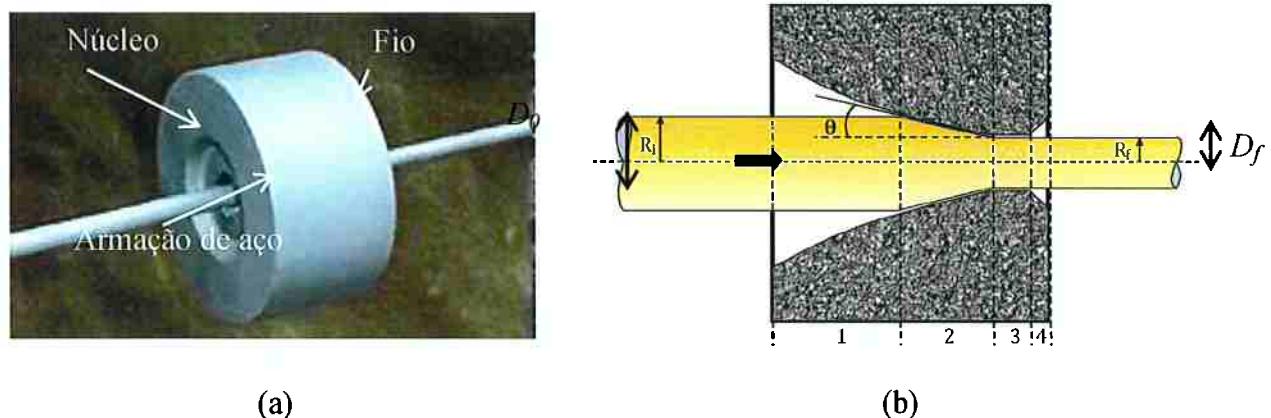


Figura 2.15 – Fieira usada na trefilação. Em (a) é apresentada uma foto [26] e em (b) tem-se o perfil de uma fieira e suas principais zonas 1,2,3 e 4 [27].

Na vista lateral da fieira Figura 2.15 (b) as zonas 1, 2, 3 e 4 representam respectivamente: o cone de entrada do fio, a parte ativa da fieira que é o cone de trabalho, a zona cilíndrica e o cone de saída do fio. O ângulo θ corresponde à metade do ângulo α da fieira e pode assumir valores entre 5° e 8° , valores ótimos para minimizar a fricção entre fio e fieira e consequentemente minimizar o esforço de trefilação.

Portanto, a definição da geometria da fieira visa à optimização das tensões e esforço de trefilação conservando as melhores condições de deformação do material. É através dessa geometria que o percentual de trabalho a frio da fieira ou taxa de redução de diâmetro do fio (TR), como será denominado neste trabalho, é determinado [24]. Essa taxa é calculada a partir dos valores de seção inicial do fio S_0 e seção final S_f de saída do fio da fieira:

$$\%TR = \left(\frac{S_0 - S_f}{S_0} \right) * 100 \quad (3)$$

Simplificando:

$$\%TR = 1 - \left(\frac{D_0}{D_f} \right)^2 * 100 \quad (4)$$

Os esforços submetidos pelo conjunto fio-fieira durante a redução de diâmetro podem ser descritos por um sistema de 5 tensões [28] :

- A tensão de saída σ_s relacionada ao esforço de trefilação (ET);
- A tensão de entrada σ_e relacionada à contra-tração (CT);
- A deformação interna σ_i relacionada à força de deformação plástica interna do material;
- O atrito σ_f relacionado ao contato fio/fieira;
- O trabalho redundante σ_r relacionado às heterogeneidades de deformação entre o interior e a superfície do fio [29]

A análise mecânica de Avitzur [30] permite estabelecer o balanço de tensões envolvidas na trefilação úmida (Figura 2.16):

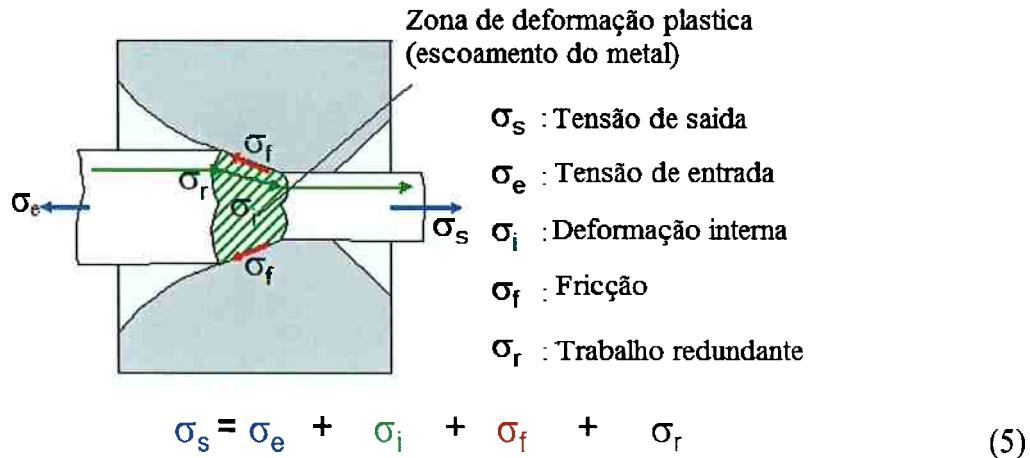


Figura 2.16 – Balanço de tensões envolvidas na trefilação.

A tensão de trefilação depende fortemente:

- Da geometria da fieira: o valor do ângulo da fieira e seu comprimento irão determinar a superfície de contato entre o fio e a fieira, interferindo na parcela de fricção do balanço de tensões;
- Das propriedades mecânicas do fio: mais particularmente de seu limite de escoamento.
- Das condições de fricção na interface fio-fieira [31] que são definidas pelo lubrificante utilizado.

A contribuição de cada uma das tensões em relação ao esforço total de trefilação corresponde a: 10% para a tensão de entrada, 40% para a deformação plástica interna, 30% para a fricção entre fio e fieira e finalmente 20% para o trabalho redundante [10].

2.3.2. Variáveis do processo de elaboração de fios de aço

Na trefilação úmida diversos aspectos influenciam as características do fio trefilado. Entre eles estão: o escorregamento do fio sobre os cabrestantes, que está relacionado às possíveis rupturas do fio e alterações na microestrutura do material; a fricção entre os elementos da máquina de trefilação e o fio; a temperatura do banho de lubrificante; o envelhecimento do fio durante o processo, a velocidade de trefilação e a potência do motor da máquina em trabalhar.

2.3.2.1. Escorregamento entre fio e cabrestantes

Para evitar a ruptura do fio durante o processo, ou seja, que as forças de tração na entrada e na saída da fieira sejam equivalentes, os cabrestantes devem apresentar uma velocidade linear maior que a velocidade linear de passagem do fio. Este fenômeno é denominado “escorregamento”. A velocidade angular de rotação dos cabrestantes de um mesmo jogo é a mesma, sendo assim, os cabrestantes que possuem diâmetros maiores apresentaram velocidades lineares superiores às velocidades de cabrestantes de diâmetros menores.

Com o objetivo de acomodar o aumento da velocidade linear de passagem do fio, depois de cada uma das fieiras o cabrestante seguinte deve apresentar um diâmetro superior ao do cabrestante precedente. Todos eles são colocados em rotação pelo motor da máquina de trefilação e o escorregamento do fio sobre cada cabrestante pode ser determinado pela equação abaixo:

$$\% \text{Escorregamento} = \frac{V_{\text{cabrestante}} - V_{\text{fio}}}{V_{\text{cabrestante}}} \times 100 \quad (6)$$

$V_{\text{cabrestante}}$ (m/min): Velocidade linear do cabrestante

V_{fio} (m/min): Velocidade linear do fio de aço

Se o escorregamento for negativo, a velocidade do fio é muito grande e as rupturas são iminentes. Porém, se o escorregamento é positivo e tem um valor muito alto, o fio escorrega mais que o necessário sobre o cabrestante, fato que irá gerar um desgaste maior por fricção, podendo danificar a superfície do fio. Em geral, os valores de escorregamento variam entre 10% e 30%.

2.3.2.2. A fricção entre o fio e a fieira

Na trefilação úmida a fricção é um fenômeno parasita, pois provoca o aumento do esforço necessário para a passagem do fio pela fieira e também o aumento da temperatura do fio na zona de contato com a fieira [32].

O lubrificante utilizado é composto de água, de uma fase oleosa, de tensoativos e aditivos. Ele permitirá uma diminuição no coeficiente de fricção entre fio, fieiras e cabrestantes, portanto, ele proporcionará o prolongamento do tempo de vida das fieiras e dos cabrestantes.

Esta lubrificação consiste na formação de um filme de lubrificante, que separa as superfícies por lubrificação hidrodinâmica a fim de minimizar a fricção e o desgaste dos equipamentos. Além disso, ela garante o resfriamento do fio e dos elementos constituintes da máquina de trefilação e assegura o estado da superfície e das propriedades mecânicas do fio de aço trefilado.

2.3.2.3. Temperatura de aquecimento do fio

O conhecimento desta variável do processo é essencial, pois um aquecimento excessivo do banho de lubrificante pode provocar modificações microestruturais no aço, aumentando assim a quantidade de defeitos de superfície e gerando uma degradação de suas propriedades mecânicas. Ademais, o aquecimento excessivo conduz a uma degradação do lubrificante e portanto uma lubrificação menos eficaz [33].

2.3.2.4. Envelhecimento do fio

Os fios de aço estudados podem ser submetidos a dois tipos de envelhecimento: estático e dinâmico. O envelhecimento do fio consiste na evolução da microestrutura do material durante ou após a deformação para atingir um estado de mínima energia.

O envelhecimento estático está associado a uma reorganização da estrutura endurecida do fio após a trefilação. A evolução da estrutura e a reorganização dos átomos de carbono do aço ao decorrer do tempo provoca um aumento da resistência mecânica acompanhado de uma perda de ductilidade e tenacidade do material [34]. Desse modo, o envelhecimento estático do material prejudicará seu comportamento mecânico.

O envelhecimento dinâmico do material ocorre durante o processo de trefilação e está relacionado ao aquecimento do fio provocado pela deformação sofrida, que se traduz pela aceleração da multiplicação de discordâncias no material, imobilização destas e pela segregação dos carbonos intersticiais [35]. Como consequência, este envelhecimento torna-se um fator determinante na capacidade dos fios em formarem os cabos de aço. Alguns efeitos do envelhecimento dinâmico podem ser: danificação do fio, presença de defeitos de superfície ou heterogeneidades da microestrutura do aço.

Os testes realizados para esse trabalho incluem dois grupos de fios de aço: “fios a tempo zero”, testados diretamente após a trefilação úmida em até 24 horas, onde somente o envelhecimento dinâmico atuou e “fios envelhecidos” testados após envelhecimento estático imposto, através do aquecimento do fio em estufa a 150°C durante 1h.

2.3.2.5. Velocidade de trefilação

Esta variável do processo exerce um papel importante, pois tanto o aquecimento da superfície do fio como a potência consumida pela máquina para a trefilação são fortemente dependentes da velocidade de trefilação.

A velocidade de trefilação é definida através da velocidade máxima com a qual se obtém uma alta produção de fios trefilados sem que haja rupturas do fio e grande solicitação do motor da máquina de trefilação. Ela também depende de alguns fatores como: diâmetro inicial do fio a ser trefilado, conjunto de fieiras utilizado e tipo de fio a ser trefilado.

2.3.2.6. Potência útil consumida pela máquina de trefilação

A máquina de trefilação úmida estudada apresenta um único motor, capaz de fornecer a potência necessária para a passagem do fio através de todas as fieiras. Essa potência resulta da intensidade fornecida na entrada do variador ligado ao motor da máquina. Essa relação entre intensidade e potência gera uma dificuldade em iniciar o processo de trefilação para certas rotas de redução de diâmetro dos fios de aço, sobretudo as rotas associadas à produção de fios de ultra-alta resistência UHT.

2.4. Cabos metálicos

2.4.1. Estrutura dos cabos metálicos

Os cabos metálicos correspondem ao conjunto de fios de aço enrolados em forma de hélice. São aplicados principalmente em pneus de carro, de caminhões leves, de caminhão de carga, de equipamentos pesados e de avião [36]. A principal aplicação para os cabos de aço são os pneus radiais. Neste trabalho foram estudados os cabos metálicos destinados à fabricação de pneus para caminhões e equipamentos pesados usados em engenharia civil.

Os cabos de aço podem ser constituídos de 2 a 210 fios de aço e são caracterizados pelo sentido no qual eles são enrolados em hélice (Figura 2.17), por sua arquitetura (Figura 2.18) e pelo seu passo (Figura 2.19).

Sentido S: torção à esquerda

Sentido Z: torção à direita

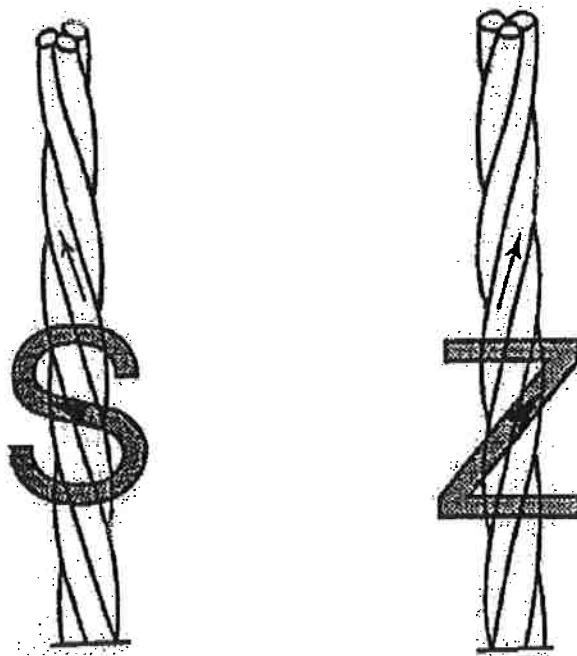


Figura 2.17 – Sentidos de formação da estrutura helicoidal dos cabos metálicos [10].

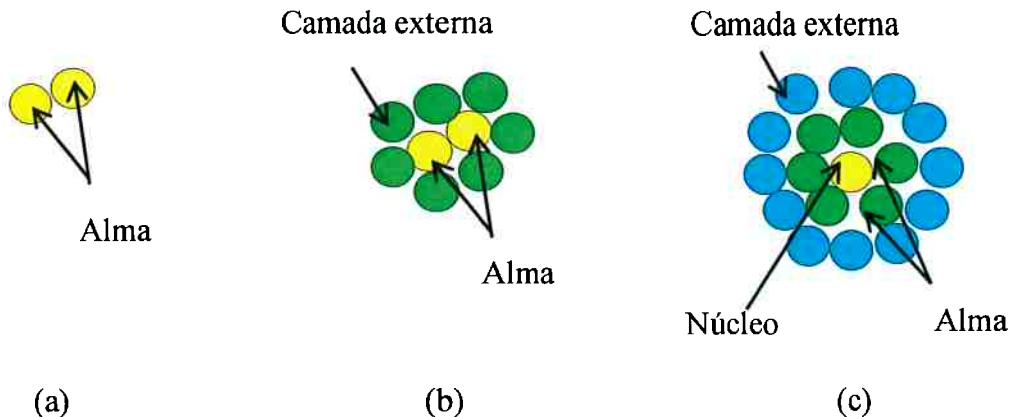


Figura 2.18 – Arquitetura formada por (a) 2 fios, (b) uma alma e uma camada externa de fios e (c) um núcleo, uma alma e uma camada externa de fios.

A arquitetura de um cabo metálico é apresentada da seguinte forma:

$$N_1 + N_2 + N_3 + N_4$$

N_1 : Número de fios que compõe a alma ou núcleo.

N_2 : Número de fios que compõe a primeira camada ou camada mais externa.

N_3 : Número de fios que compõe a segunda camada ou camada mais externa.

N_4 : Número de fios que compõe a terceira camada ou camada mais externa.

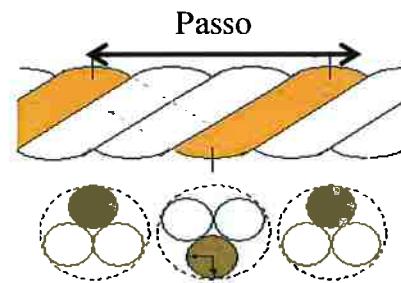


Figura 2.19 – Passo da corda de aço [10].

Sabe-se que o passo definitivo do cabo metálico é determinado a partir de:

$$Passo\ do\ cabo\ metálico = \frac{2 \times \text{Velocidade de rotação dos fios}}{\text{Velocidade linear de produção do cabo metálico}} \quad (7)$$

2.4.2. Características do processo de fabricação de cabos metálicos

As principais características exigidas dos cabos de aço são:

- Alta resistência mecânica;
- Resistência à tração, alongamento e torção;
- Composição de revestimento, espessura e forma adequadas;
- Flexibilidade e compressão;
- Resistência à fadiga, à corrosão e alta aderência à borracha.

O processo de fabricação dos cabos de aço necessita de um rígido controle das características de transformação dos cabos metálicos (retidão, curvatura, torção residual e alongamento estrutural) para que haja uma integração perfeita entre estes e a borracha, constituindo então as lonas de topo do pneu. O processo estudado combina um movimento de rotação do cabo metálico com um movimento de translação dele mesmo. Através desse processo de rotação, os fios de aço são submetidos a uma torção coletiva e individual ao redor de seu próprio eixo. A Figura 2.20 e a Figura 2.21 ilustram respectivamente esses movimentos de torção por alimentação rotativa e por recepção rotativa.

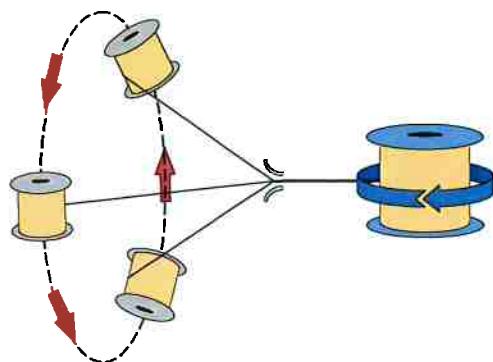


Figura 2.20 – Fabricação de cabos por bobina de alimentação rotativa [35].

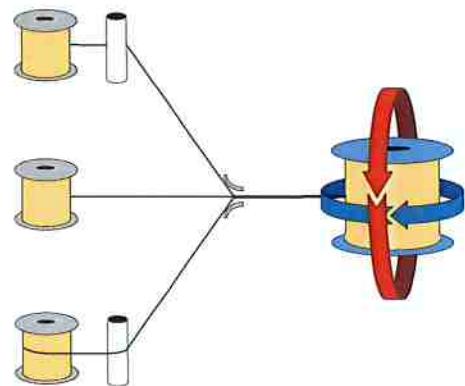


Figura 2.21 – Fabricação de cabos por bobina de recepção rotativa [35].

Durante o processo de enrolamento dos fios, eles serão submetidos, por vezes simultaneamente, às seguintes tensões: tração, adicionada pelos freios dos suportes das bobinas; torção, proveniente da rotação dos volantes da máquina e pela presença de um retorcedor e de um cablador; e flexão, resultado da passagem do fio pelas polias, grãos e cabrestantes.

A Figura 2.22 ilustra de maneira simplificada essas três solicitações durante a passagem do fio por uma polia que é responsável por direcionar e guiar o fio ao longo do processo de fabricação de cabos metálicos.

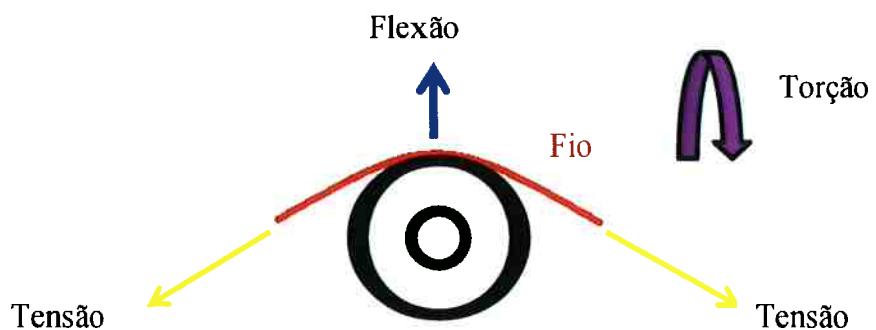


Figura 2.22 – Esquema das solicitações submetidas pelo fio durante sua passagem por uma polia.

Sendo assim, a formação de cabos de aço pode ser assimilada a uma flexão desviada dos fios, coletiva e simultânea. A torção em cada fio é uma solicitação complementar própria do processo descrito acima. A atuação desta solicitação no fio modifica significativamente o estado de tensões dos fios, o que resulta em um reequilíbrio de tensões antes que os cabos sejam enrolados nas bobinas e encaminhados para a próxima etapa do processo de fabricação de reforços metálicos, a calandragem.

3. OBJETIVO

Diante da problemática relacionada aos limites já existentes no processo de fabricação de cabos metálicos, o interesse deste estudo reside na avaliação desses limites através de uma análise mecânica do processo.

O processo atual de trefilação úmida apresenta uma dificuldade relacionada ao funcionamento do motor da máquina de trefilação para a produção de fios de aço UHT (entre 3300 e 3750 MPa) de grande diâmetro, entre 300 e 420 μ m.

Já no processo de fabricação de cabos metálicos existe a dificuldade em prever o comportamento dos fios durante o processo industrial e também a dificuldade em produzir cabos metálicos apresentando arquiteturas diferentes (muito complexas) constituídas também de fios de grande diâmetro.

4. MATERIAIS

4.1. Trefilação úmida

Os materiais utilizados na avaliação dos limites de elaboração dos fios de aço durante a trefilação úmida são:

- Fios de aço SHT, latonados, com resistência mecânica de 1410 Mpa e com diâmetro inicial de 1750 μm ;
- Fios de aço UHT, latonados, com resistência mecânica de 1440 Mpa e com diâmetro inicial de 2150 μm ;
- Sete conjuntos de fieiras;
- Máquina de trefilação úmida (Figura 4.1).

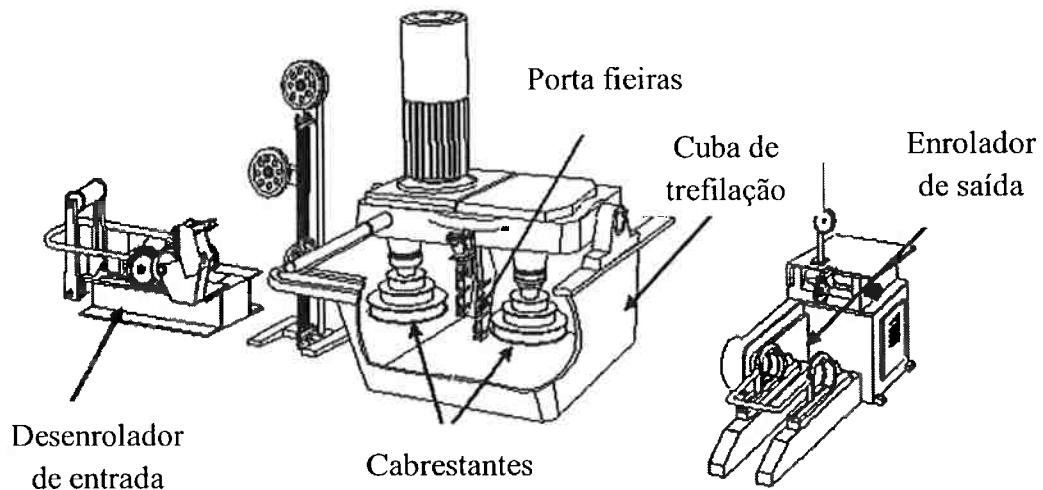


Figura 4.1 – Tipo de máquina de trefilação úmida [37].

A máquina de trefilação úmida é constituída dos equipamentos apresentados a seguir:

- Um sistema para desenrolar o fio da bobina;
- Conjunto de fieiras, ou “gama de trefilação” (utilizando-se de uma tradução livre do termo francês *gamme de tréfilage*) composta por certo número de fieiras,

geralmente entre 17 e 23, localizadas entre dois jogos de cabrestantes, pelas quais o fio terá seu diâmetro reduzido e será trefilado;

- Porta-fieiras para evitar que as fieiras saiam de sua posição correta;
- Dois jogos de cabrestantes, cilindros motorizados com diferentes diâmetros. Cada jogo possui 4 ou 5 cabrestantes de diâmetros diferentes adaptados à quantidade de fieiras usadas para a trefilação;
- Banho de lubrificante onde fieira, porta-fieira e cabrestantes estão imersos;
- Um sistema para enrolar o fio já trefilado em bobinas;
- Um motor capaz de fornecer até 34 kW de potência e 56A de intensidade nominal em produção estabilizada.

Os elementos chave desse processo são: a fieira, o cabrestante e o motor da máquina. As fieiras são responsáveis por deformar o material, os cabrestantes garantem os esforços de tração necessários para esse processo de deformação e o motor fornece a potência e a intensidade necessárias para o funcionamento de todos os constituintes da máquina de trefilação.

Os cabrestantes

Neste processo de trefilação o fio é tracionado pelos cabrestantes engrenados em rotação, que transmitem, por atrito, a força necessária à trefilação. A vazão volumétrica de fio é igual para cada fieira, sendo assim, a cada passagem do fio através de uma fieira, seu diâmetro é reduzido e esta redução é acompanhada de um aumento da velocidade linear do fio durante sua passagem que é proporcional ao seu alongamento.

As fieiras

A fieira tem o principal papel na trefilação por reduzir o diâmetro dos fios conforme determinada especificação. Assim, um conjunto de fieiras é definido pela taxa de redução de diâmetro imposta ao fio. O conjunto de fieiras é composto por fieiras de diâmetros internos diferentes e podem ser: Reto, Curvo, Zelin e Degrassivo. A quantidade de fieiras presentes em cada um deles varia entre 17 e 23 para que seja mantido o equilíbrio de esforços de trefilação, evitando a ocorrência de rupturas no material. Os conjuntos de fieiras utilizados neste trabalho são:

- Reto (19 a 23 fieiras). Taxas de redução de diâmetro constantes em todas as fieiras, que variam entre 14% e 23%; Reto de última fieira com taxa de redução pequena UFTP (19 a 23 fieiras). Taxas de redução constantes em todas as fieiras exceto na última, a qual apresenta taxas que variam entre 3% e 6%;
- Curvo (17 a 21 fieiras). Taxas de redução que aumentam durante a primeira metade das fieiras e que diminuem ao longo da outra metade. Essas taxas variam entre 5% e 25%;
- Zelin (17 a 21 fieiras). Taxas de redução aumentam na primeira metade das fieiras e assumem valores constantes para a segunda metade delas. Elas variam entre 14% e 30%;
- Degrassivo (17 fieiras). Taxas de redução que diminuem durante a trefilação e que assumem valores entre 10% e 30%.

O motor da máquina

As máquinas de trefilação utilizadas no estudo são equipadas de um motor capaz de fornecer até 34 kW de potência e 56A de intensidade nominal em produção estabilizada. Entretanto, durante o ponto de início do funcionamento, a intensidade máxima tolerada corresponde a três vezes a intensidade nominal, sendo então equivalente à 168A. Próximo a estes limites, a máquina apresenta grande dificuldade em iniciar seu funcionamento quando rotas de redução de diâmetro não clássicas para fabricar fios UHT são utilizadas.

4.2. Fabricação de cabos metálicos

Capacidade dos fios de aço em formarem cabos metálicos

Para avaliar a capacidade dos fios de aço em formarem cabos metálicos, foram utilizados: fios de aço trefilados (Tabela 4.1) envelhecidos em estufa ($T_{env} = 1h\ 150^{\circ}C$) ou não ($T_{env} = 0$) e duas máquinas protótipos de fabricação de cabos metálicos, uma para a realização de testes de torção simples, e outra para testes de torção e distorção.

Tabela 4.1 – Fios de aço utilizados nos testes de torção simples e de torção e distorção.

Diâmetro do fio	Teor de carbono	T _{env}	Resistência mecânica
300 μm			3305
	0,9% (SHT)	0	3343
			3434
			3560
300 μm	0,9% (SHT)	1h 150°C	3579
			3598
			3476
	1,0% (UHT)	0	3570
300 μm			3735
	1,0% (UHT)	1h 150°C	3750

A máquina utilizada para a realização de testes de torção simples é uma máquina de fabricação de cabos metálicos por bobina de alimentação rotativa e é constituída de um único par de volantes, que conferem uma torção simples nos fios que formarão o cabo de aço. Ela esquematizada na Figura 4.2 a seguir:

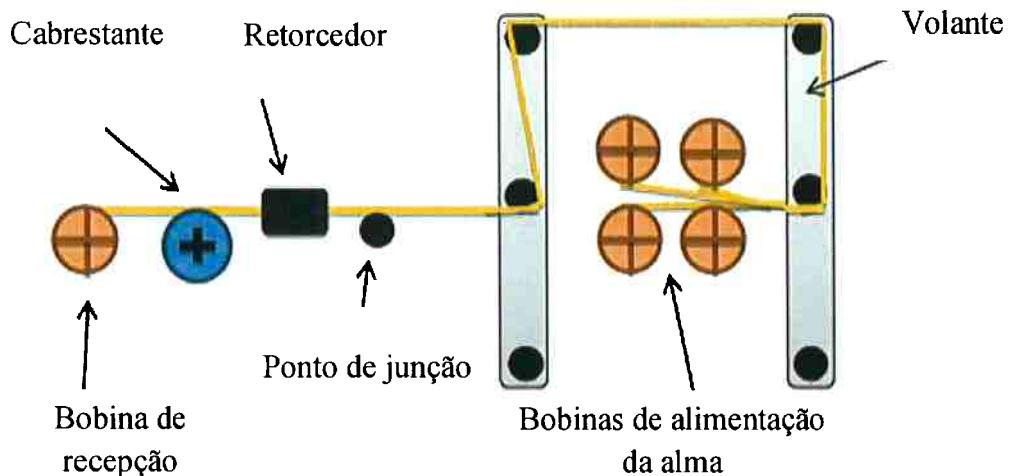


Figura 4.2 – Esquema da máquina protótipo de fabricação de cabos metálicos.

Os testes de torção-distorção são realizados na máquina que apresenta duas caixas, (Figura 4.3). Na segunda caixa os fios são submetidos à torção e à distorção, nesta ordem.

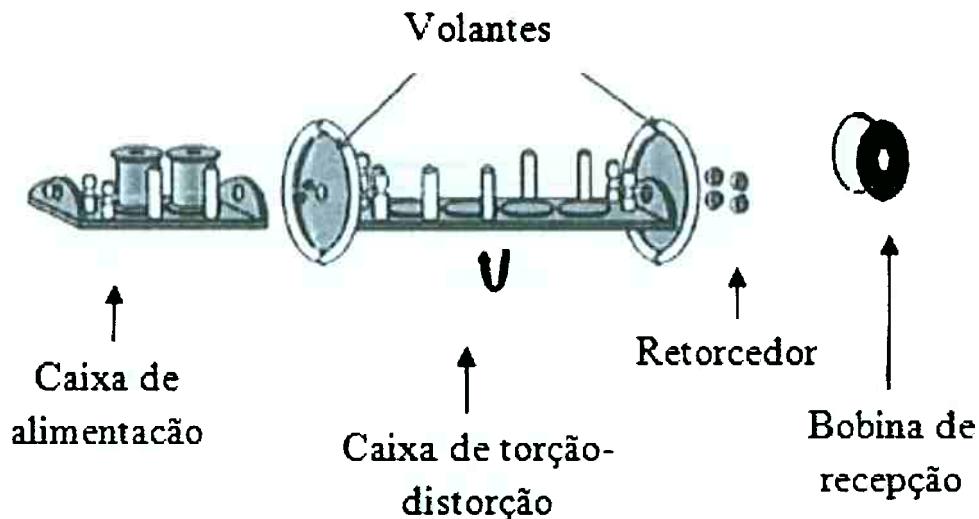


Figura 4.3 – Máquina protótipo de torção e distorção.

Limites de fabricação de cabos metálicos

Para este estudo foram utilizados fios de aço trefilados com diâmetros de $380\mu\text{m}$, $400\mu\text{m}$ e $420\mu\text{m}$. Os valores de resistência mecânica desses fios não podem ser mencionados por razões de confidencialidade.

A máquina utilizada na fabricação dos cabos metálicos estudados neste trabalho (Figura 4.4) é composta por um sistema de fabricação de cabos por bobina de alimentação rotativa acoplado a um sistema de bobina de recepção rotativa.

Este acoplamento permite uma maior produtividade de cabos metálicos a partir de uma grande quantidade de fios, fato que possibilita a redução no número de intervenções necessárias de operadores.

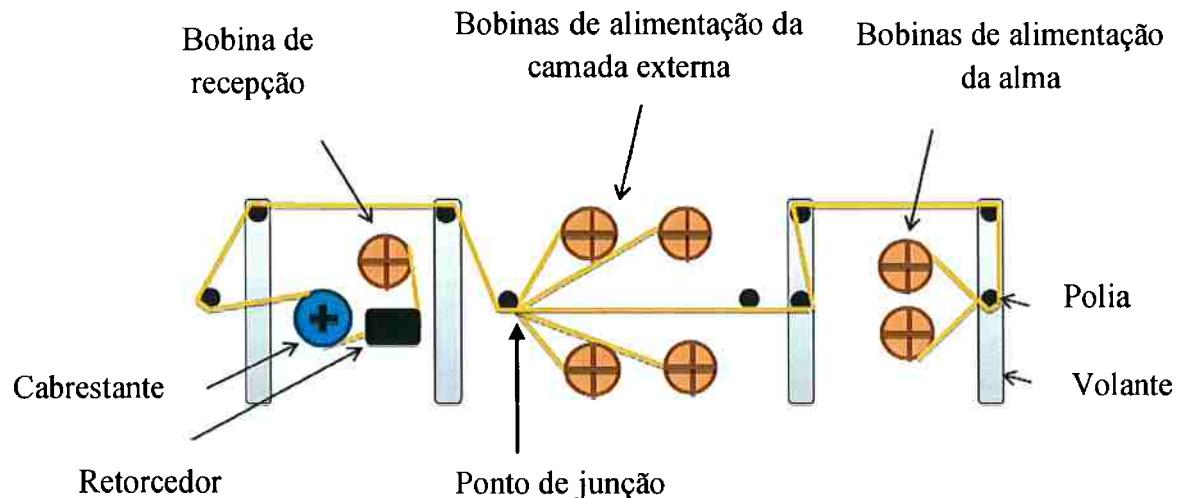


Figura 4.4 – Esquema da máquina de fabricação de cabos por bobinas de alimentação e de recepção rotativas.

As funções asseguradas pela bobina de recepção da máquina acima são:

- Fornecer ao cabo metálico seu passo definitivo pela presença de dois volantes que giram, impondo uma dupla torção aos fios;
- Estabilizar o cabo em relação ao nível de torção presente nele, através da utilização de ferramentas de equilíbrio do cabo;
- Garantir o entrelaçamento linear dos fios pelo uso de cabrestantes;
- Enviar o cabo para ser corretamente disposto na bobina de recepção.

Na bobina de recepção da máquina é utilizado um retorcedor, constituído de roldanas de pequeno diâmetro (entre 17 mm e 22 mm), através das quais o cabo circula. Este retorcedor contribui para anular as torções residuais presentes no cabo.

Ele faz com que seja aplicado no cabo um ciclo de flexões que permite a diminuição da aeração do cabo além de torná-lo mais retilíneo. Essa aeração corresponde ao volume de espaços livres formados entre os fios de aço entrelaçados e, em excesso, interfere na penetração da borracha no cabo metálico durante o processo de calandragem, gerando defeitos nas lonas e prejudicando suas propriedades mecânicas quando o pneu é utilizado.

5. MÉTODOS

Este trabalho foi subdividido em três ramos de estudo: a avaliação dos limites de elaboração de fios metálicos UHT de grande diâmetro durante o processo de trefilação úmida; a avaliação da capacidade estrutural destes fios em formar cabos metálicos; e a avaliação dos limites de fabricação de cabos metálicos destinados para uso em pneus de veículos pesados.

5.1. Trefilação úmida: avaliação dos limites de elaboração dos fios de aço

Neste ramo de estudo, foi feita uma avaliação dos parâmetros do processo de trefilação úmida através de dois meios: um deles baseado no estudo teórico do processo, e outro baseado em ensaios sobre a máquina a fim de validar o modelo proposto na teoria.

O estudo teórico foi realizado através da utilização e optimização de um *software* de simulação dos esforços mecânicos envolvidos neste processo. A avaliação empírica das características de funcionamento da máquina de trefilação e de seus equipamentos contribuiu para a avaliação dos limites de fabricação de fios de aço de grande diâmetro e super alta resistência mecânica.

Esta etapa de análise mecânica do processo de trefilação úmida contribuirá para determinar a relação entre as características microestruturais dos fios adquiridas ao longo do processo de trefilação úmida com o comportamento mecânico deles quando submetido às solicitações envolvidas no processo de fabricação dos cabos metálicos.

5.1.1. Software de simulação de esforços na trefilação úmida

Para obter uma análise mecânica mais profunda da trefilação úmida foi utilizado e desenvolvido um *software* de simulação de esforços no processo. Nesta etapa, modelos de cálculo de esforços mecânicos durante o processo foram utilizados para obter uma melhor

compreensão dos fenômenos que se produzem ao longo da trefilação úmida e também para identificar os pontos críticos na elaboração dos fios de aço.

O processo de trefilação úmida pelo qual um fio passa pode ser caracterizado pela rota de redução (Tabela 5.1) de diâmetro submetido pelo fio. Essas rotas de redução de diâmetro podem ser iniciadas por fios que apresentem diâmetros compreendidos entre 1000 e 2500 μm e serem terminados por fios de diâmetros entre 150 e 450 μm .

Tabela 5.1 – Exemplos de rotas de redução de diâmetro dos fios de aço utilizados

Destinação dos fios trefilados a partir da rota de redução de diâmetro	Diâmetro inicial (μm)	Diâmetro final (μm)
Fios super alta resistência SHT	1750	300
Fios super alta resistência SHT	1750	400
Fios ultra-alta resistência UHT	2150	300
Fios ultra-alta resistência UHT	2150	400

Atualmente, o processo de trefilação úmida a partir de fios de aço de diâmetro de 2150 μm demanda um consumo de potência útil maior e exige esforços de trefilação superiores quando comparados às rotas de redução de diâmetro mais clássicas. Neste estudo são considerados fios de grande diâmetro os fios que possuem diâmetro maior ou igual a 350 μm . Rotas de redução de diâmetro clássicas são aquelas relacionadas à fabricação de fios de aço de super alta resistência mecânica SHT.

Depois de aperfeiçoado, este *software* permite calcular os seguintes valores, baseando-se nos diâmetros de entrada e de saída do fio em cada uma das fieiras utilizadas:

- De resistência mecânica do fio de aço;
- Dos esforços de trefilação necessários para a passagem do fio através da fieira;
- De energia, em Joules, necessária para a passagem através da fieira;

- De potência útil consumida, em kW, pelo motor a cada passagem do fio pelas fieiras.

Além disso, a soma da energia envolvida na passagem do fio por cada fieira irá compor a energia total relacionada ao processo completo de trefilação úmida. De forma análoga, a potência útil total consumida ao longo do processo é determinada pela soma das potências consumidas na passagem do fio por cada uma das fieiras.

Um dos limites do processo foi colocado em evidência através de uma dificuldade de funcionamento da máquina durante a trefilação realizada a partir de rotas de redução de diâmetros não clássicas. Os cálculos realizados com ajuda do *software* permitem uma análise mais aprofundada da influência dos parâmetros do processo sobre a potência útil que deve ser fornecida pelo motor da máquina de trefilação e sobre os esforços mecânicos necessários para o processo. Os parâmetros analisados são :

- O diâmetro inicial do fio;
- A rota de redução de diâmetros;
- O conjunto de fieiras utilizado;
- O ângulo α da fieira;
- O coeficiente de fricção entre o fio e a fieira;
- A velocidade de produção dos fios de aço;
- A resistência mecânica inicial do fio latonado antes da trefilação.

Atualmente o *software* está adaptado aos cálculos de trefilação baseados no funcionamento estável da máquina e não nos pontos de partida e de fim. A determinação dos pontos críticos de funcionamento da máquina ao longo do processo foi feita a partir de medidas físicas de potência útil realizadas na máquina, que complementam as informações e dados obtidos pelo *software* de simulação de esforços na trefilação úmida.

Os cálculos realizados contribuem para determinar as taxas de redução de diâmetro em cada uma das fieiras e consequentemente o conjunto de fieiras usado, a resistência mecânica do fio de aço na saída da máquina e a potência útil envolvida no processo.

A Tabela 5.2 ilustra alguns dos parâmetros que são considerados na simulação dos esforços de trefilação do processo, assim como resultados obtidos através desses cálculos. O cálculo foi feito para a trefilação úmida de um fio a 0,9% de C, SHT, com rota de redução de diâmetro de 1750 a 300 μm . Hachurados, os parâmetros de entrada, circulados, os resultados:

a resistência mecânica do fio trefilado, a soma dos esforços mecânicos e a potência útil consumida ao longo da trefilação.

Tabela 5.2 – Exemplo dos principais parâmetros utilizados nos cálculos do software de simulação de esforços na trefilação.

Nº da Fieira	Diâmetro da Fieira	Velocidade de saída do fio	Resistência Mecânica	Esforços de Trefilação	Potência útil entre-fieiras
1 ^a ...	1613 μm	22 m/min	1350 MPa	1111 N	440 W
...2 ^a ...	1480 μm	26 m/min	1590 MPa	995 N	470 W
...20 ^a ...	308 μm	565 m/min	3332 MPa	105 N	895 W
21 ^a	300 μm	600 m/min	3381 MPa	52 N	320 W
Total			3506 MPa	9312 N	12,6 KW

5.1.2. Análise do funcionamento da máquina de trefilação

A máquina de trefilação úmida usada como referência para este estudo é constituída por um motor que apresenta um limite de potência para seu funcionamento. Sendo assim, este trabalho visa avaliar com mais precisão quais são as rotas de redução de diâmetro dos fios que ultrapassam este limite do motor para possibilitar. Essa avaliação permitirá o desenvolvimento de soluções para as problemáticas do processo utilizado atualmente.

Para analisar o funcionamento da máquina de trefilação foram realizadas medidas de potência e intensidade do motor-variador que equipam a máquina. Os resultados permitem que o limite de funcionamento desses equipamentos seja determinado.

5.2. Capacidade dos fios de aço em formarem cabos metálicos

A facilidade com que os fios formam cabos pode ser rapidamente determinada pela realização de testes específicos e pela análise das propriedades mecânicas dos fios trefilados. Estes testes são realizados em protótipos e em máquinas industriais de fabricação de cabos metálicos. Eles fornecem informações importantes com as quais é possível estimar o comportamento do fio quando submetido às solicitações de tensão, torção e flexão.

Algumas propriedades estruturais dos fios também são reveladas ao longo desses testes, por exemplo, a presença de defeitos de superfície e as inclusões que contribuem para os mecanismos de ruptura do fio no processo de fabricação de cabos metálicos. O objetivo da execução desses testes é relacionar as propriedades do fio obtidas nas etapas anteriores com a capacidade do fio em formar cabos metálicos nas máquinas industriais. Os testes determinarão a influência das seguintes variáveis sobre a aptidão dos fios à fabricação de cabos:

- Porcentagem de carbono presente no material;
- Efeito do envelhecimento estático do material;
- Resistência mecânica do fio de aço diretamente após trefilação e após envelhecimento;
- Tensão de desenrolamento das bobinas de alimentação.

A medida física da capacidade do fio em formar cabos é obtida pelo número de rupturas que ocorrem no comprimento total do cabo formado durante o teste. As condições do teste serão apresentadas no capítulo **Resultados e Discussões** deste trabalho. Os resultados obtidos serão úteis para a validação dos testes como ferramenta adequada para a determinação do comportamento do fio em máquinas industriais.

Um dos testes foi realizado sobre uma máquina na qual os fios são submetidos a uma torção simples, e outro teste foi feito sobre uma máquina onde os fios eram submetidos à torção e à distorção. Os testes foram especificados diferentemente dos testes realizados atualmente a fim de fornecer informações complementares em relação à aptidão dos diferentes fios de aço ao processo de fabricação de cabos metálicos.

5.2.1. Teste de torção simples

Os testes de torção simples foram realizados para fabricar cabos metálicos compostos por dois fios de aço. As condições de realização dos testes de torção simples são listadas a seguir:

- Comprimento do teste: 2000 m de cabo fabricado;
- Velocidade de rotação dos volantes: 3000 rotações/minuto;
- Tensão de desenrolamento das bobinas de alimentação: 3,5 daN.

Os resultados obtidos nesses testes forneceram o nível de torção ao qual o fio pode ser submetido sem que haja rupturas durante o processo de fabricação dos cabos metálicos, ou seja, a quantidade de rotações que os fios podem suportar sem romper por metro de cabo metálico produzido. A unidade de medida é expressa em rotações por metro (rt/m).

Para que os testes e os resultados sejam o mais próximos à realidade e para que haja a reproduzibilidade dos ensaios, certas condições de teste foram mantidas, como por exemplo: a máquina utilizada e o comprimento de produto/cabo fabricado.

5.2.2. Teste de torção e distorção

As condições de realização destes testes são as seguintes:

- Arquitetura do cabo metálico: 2 fios de aço;
- Comprimento do teste: 2000 m de cabo fabricado;
- Velocidade de rotação dos volantes: 3000 rotações/minuto;
- Tensão de desenrolamento das bobinas de alimentação: 1,75 daN.

Estes testes são utilizados para obter outras informações em relação a capacidade dos fios em formarem cabos metálicos, já que são considerados mais exigentes pois os fios são submetidos a um ciclo de torções e um outro de distorções. No entanto, as máquinas industriais não promovem esses dois tipos de solicitações mecânicas no material, sendo assim, a necessidade da realização destes testes neste trabalho é questionada.

5.3. Avaliação dos limites de fabricação de cabos metálicos

Neste ramo de estudo foram determinadas as condições atuais de fabricação dos cabos metálicos formados por fios de aço UHT de grande diâmetro para que os produtos possam compor as lonas de topo que estão sendo desenvolvidas atualmente.

Nesta avaliação foram considerados os limites de fabricação de cabos de aço relacionados ao funcionamento dos sistemas de desenrolamento das bobinas de alimentação da máquina, à geometria desta e aos equipamentos que a constituem.

Na recepção da máquina industrial utilizada, o cabo metálico forma um semi-arco entre os volantes. Nesse cabo existe uma tensão resultante que é composta das tensões aplicadas em cada um dos fios de aço e das tensões que são adicionadas ao cabo durante a passagem dos fios pelos componentes da máquina, como as polias e grãos.

A tensão resultante, ilustrada na Figura 5.1, é responsável por manter o cabo metálico na forma de um semi-arco estável que apresenta uma altura adequada às características geométricas da recepção da máquina industrial. A tensão resultante pode ser calculada a partir da equação a seguir:

$$T = K \times \omega^2 \times M \quad (9)$$

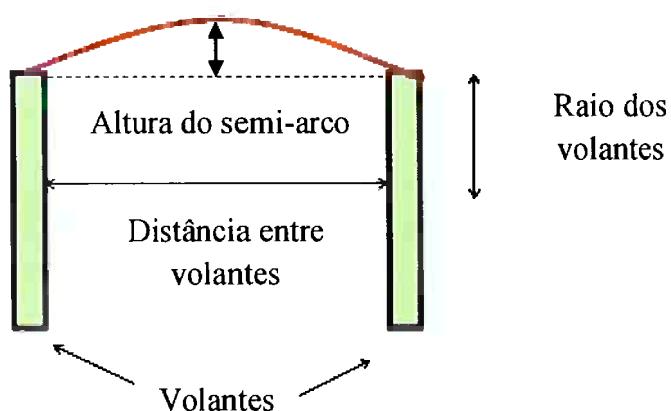


Figura 5.1 – Parâmetros geométricos da máquina industrial empregados no cálculo da tensão do semi-arco.

T : Tensão resultante necessária para manter o semi-arco (N);

K : constante da máquina (é uma função do raio dos volantes e da distância entre eles);

W : velocidade de rotação dos volantes (rad/s);

M : massa do cabo metálico dependente do diâmetro dos fios de aço empregados, onde:

$$M = \left(\frac{\text{Densidade do aço} * \pi}{4} \right) * (\text{Diâmetro do fio}^2) * (\text{número de fios}) \quad (10)$$

Os fios de aço que compõe os cabos metálicos são freados por um sistema que funciona com tensões que variam entre 0,5 e 3,5 daN por fio durante o desenrolamento das bobinas de alimentação. Durante este processo esses valores podem sofrer variações que são ocasionadas pela diferença de diâmetros e de peso entre a bobina de alimentação completa e a bobina vazia ao longo da produção do cabo de aço. Essas variações provocam um impacto no semi-arco formado pelo cabo entre os dois volantes da recepção da máquina.

A importância deste estudo reside na avaliação da influência dos limites de fabricação de cabos metálicos formados por fios de aço de grande diâmetro sobre as condições do sistema de desenrolamento das bobinas de alimentação, mais precisamente, sobre as tensões envolvidas no processo. As tensões são obtidas através de modelos matemáticos que simulam as condições de fabricação de cabos metálicos nas máquinas industriais. Nos testes são considerados:

- Altura máxima do semi-arco estável na recepção da máquina
- Existência de um coeficiente de segurança sobre as tensões no cabo metálico para garantir a estabilidade do semi-arco em casos de ruptura dos fios de aço;
- Simulações realizadas para as seguintes arquiteturas de cabos: 1+6, 2+7, 3+9, 1+6+12, 3+9+15 e 4+10+16;
- Simulações destas arquiteturas com fios de 3 diâmetros distintos: 0,35mm, 0,40mm e 0,45mm.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Trefilação úmida

O *software* de simulação de esforços de trefilação úmida foi utilizado para avaliar os atuais limites e dificuldades de elaboração de fios de aço pelo processo de trefilação úmida.

Todos os parâmetros do processo utilizados nos cálculos do *software* foram analisados separadamente a fim de identificar sua influência sobre os esforços de trefilação envolvidos no processo, a potência útil necessária para a trefilação, a resistência mecânica do fio trefilado e o escorregamento do fio no nível dos cabrestantes. Entretanto, serão apresentados neste trabalho apenas os parâmetros de maior influência sobre a potência útil necessária para o processo, que é um dos fatores limitantes na trefilação úmida. Os parâmetros apresentados são o conjunto de fieiras de trefilação utilizado, a rota de redução de diâmetro do fio e a velocidade de produção.

6.1.1. Conjunto de fieiras de trefilação

Para determinar a influência do conjunto de fieiras empregado sobre a potência útil necessária para o processo, foram realizadas simulações com sete diferentes conjuntos de fieiras para a produção de fios SHT de 300 μm de diâmetro, a 0,9% de carbono, através de uma rota de redução de diâmetro do fio clássica, partindo de 1750 μm a 300 μm . A velocidade de produção dos fios trefilados foi mantida a 600 m/min para todos os conjuntos de fieiras testados. A Tabela 6.1 apresenta os valores obtidos.

É importante salientar que o conjunto de fieiras empregado está relacionado à quantidade de fieiras utilizadas e também à rota de redução de diâmetro a qual o fio será submetido, sendo assim, não é possível comparar os valores obtidos para um conjunto de fieiras empregado em duas rotas de redução de diâmetro diferentes, já que, o número de

fieiras utilizado nos dois casos é diferente e portanto os esforços envolvidos na trefilação também o são.

Tabela 6.1 – Influência conjunto de fieiras na potência útil calculada consumida pelo processo.

Rota de redução do diâmetro (μm)	Conjunto de fieiras	R_{m_f} calculada (MPa)	Potência útil total calculada (kW)
1750-300	Reto	3381	12,13
1750-300	Reto UFTP	3395	12,59
1750-300	Curvo 21 fieiras	3380	12,57
1750-300	Curvo 17 fieiras	3387	12,09
1750-300	Zelin 21 fieiras	3387	12,62
1750-300	Zelin 17 fieiras	3387	12,19
1750-300	Degressivo 17 fieiras	3385	12,21

Os valores obtidos mostram que a utilização de diferentes conjuntos de fieiras para a produção de um fio de mesmo diâmetro e de resistência mecânica aproximada, não resulta em valores significativamente distintos de potência útil necessária para o processo. Consequentemente, o conjunto de fieiras não provoca dificuldades na trefilação úmida.

Todavia, os cálculos realizados não são capazes de fornecer informações suficientes para determinar o comportamento dos fios de aço durante a formação de cabos metálicos. Esse comportamento será verificado nos testes de torção simples no tópico **Teste de torção simples** deste trabalho.

6.1.2. Rota de redução de diâmetro do fio

A Tabela 6.2 ilustra os resultados obtidos pela simulação relacionados a influência das quatro diferentes rotas de redução de diâmetro sobre a potência útil fornecida pela máquina. O conjunto de fieiras utilizado é o mesmo: reto, com variação do número de fieiras entre as rotas de redução de diâmetro com a finalidade de conservar as condições de trefilação adequadas e evitar rupturas dos fios.

Tabela 6.2 – Influência da rota de redução de diâmetro do fio sobre a potência útil consumida pela máquina de trefilação.

Rota de redução de diâmetro do fio (μm)	Conjunto de fieiras	Potência útil consumida pela máquina de trefilação (kW)
1750 – 300	Reto com 21 fieiras	12,59
1750 – 400	Reto com 19 fieiras	16,37
2150 – 300	Reto com 21 fieiras	17,96
2150 – 400	Reto com 21 fieiras	21,14

Os valores teóricos obtidos revelam que as rotas de redução de diâmetro não clássicas, destinadas à fabricação de fios de aço UHT, exigem da máquina de trefilação uma potência útil maior para o processo. Comparando esses valores com o valor de potência útil máximo que o motor da máquina é capaz de fornecer, a potência útil não é um fator limitante no processo.

Entretanto, na prática, nota-se uma dificuldade de produção de fios UHT, portanto os resultados obtidos através dos cálculos teóricos serão complementados pela realização de medidas empíricas na máquina de trefilação para três rotas de redução de diâmetro: 1750 – 300μm, 2150 – 300μm e 2150 – 400μm. Estas medidas servem para determinar com clareza os pontos críticos do processo de elaboração desses fios.

Com as medidas realizadas há o incremeto dos resultados teóricos, pois são obtidos os valores de potência útil consumida ao longo das diferentes rotas de redução de diâmetro em três fases de funcionamento da máquina, em seu ínicio, em sua fase estável e durante o ponto de frenagem/parada da produção.

Estas três fases são caracterizadas por diferentes velocidades de trefilação do fio, respectivamente: 130m/min, 600m/min e 0m/min. A Figura 6.1 apresenta as medidas de potência útil e a Figura 6.2 as medidas de intensidade que foram realizadas na máquina de trefilação úmida ao longo de um dia de trabalho.

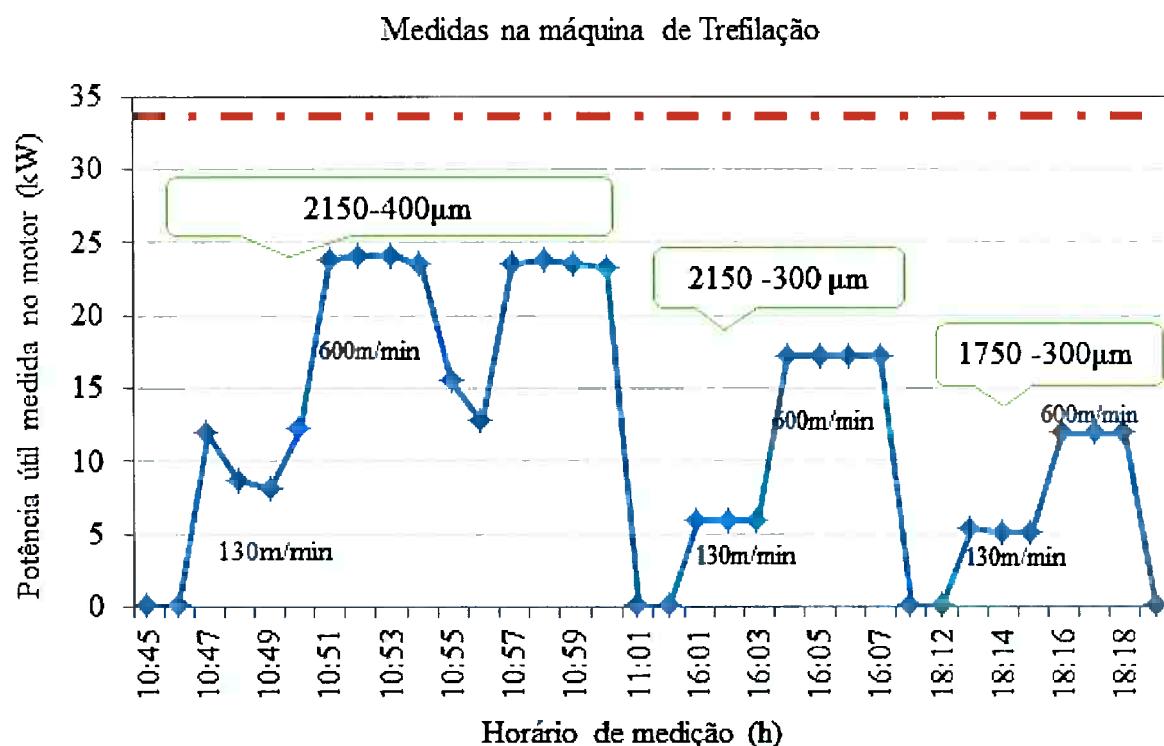


Figura 6.1 – Medidas de potência útil realizadas na máquina de trefilação úmida.

A Figura 6.1 permite concluir que a potência útil medida, assim como a potência útil calculada através da simulação mencionada anteriormente não ultrapassam o limites de potência máxima (34 kW) que pode ser fornecida pelo motor utilizado.

Medidas na máquina de Trefilação

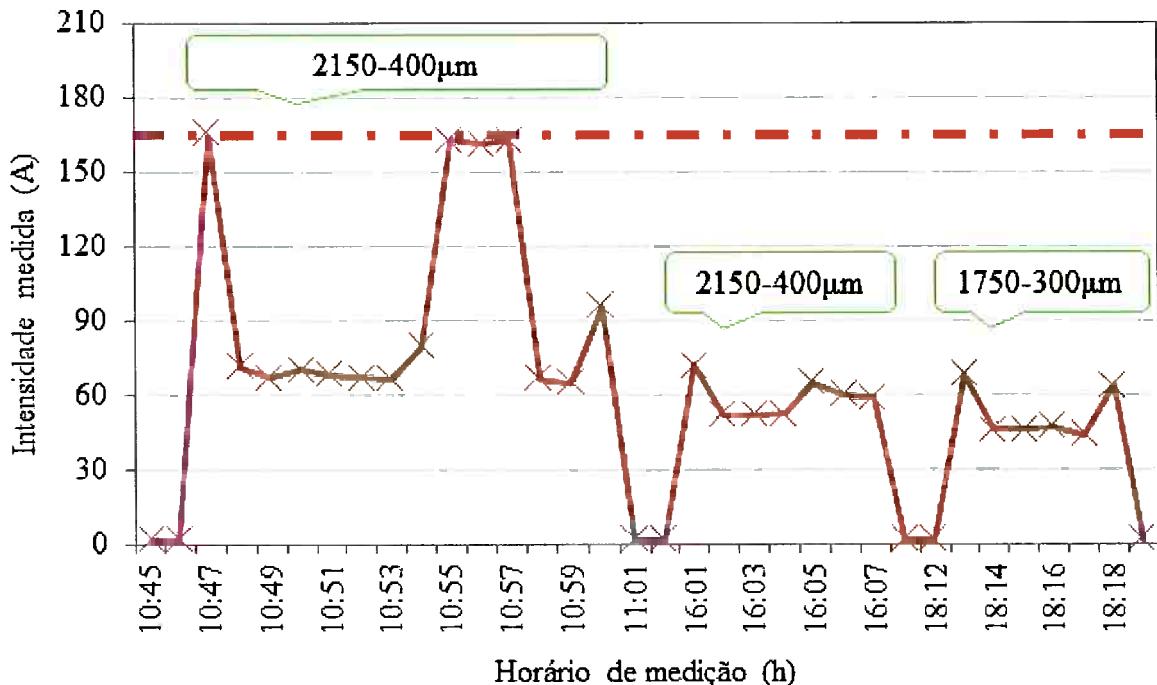


Figura 6.2 – Medidas de intensidade realizadas na máquina de trefilação úmida.

Na Figura 6.2 é possível identificar um comportamento similar entre os fios trefilados a partir de diferentes rotas de redução de diâmetro em relação às intensidades medidas na máquina de trefilação para as três rotas de redução testadas.

No ponto inicial de funcionamento da máquina, nos três casos, existe um pico nos valores de intensidade medida seguidos por um valor considerado constante durante a fase estável e por último, uma redução linear da intensidade durante a frenagem e parada da produção.

A Tabela 6.3 foi construída a partir dos valores obtidos pelos cálculos e pelas medidas realizadas e contribui para a comparação entre os resultados teóricos e experimentais e para a aproximação do modelo utilizado na simulação de esforços de trefilação úmida com o modelo real do processo.

Tabela 6.3 – Comparação entre valores de potência útil calculados e medidos para as diferentes rotas de redução de diâmetro do fio.

Rota de redução (μm)	Velocidade de produção (m/min)	Potência útil calculada (kW)	Potência útil medida (kW)	Desvio padrão entre potência calculada e medida	Pico de Intensidade medida (A)
1750-300	130	2,73	5,39	1,8809	63,90
	600	12,59	11,87	0,5091	
2150-300	130	3,67	5,93	1,5981	71,72
	600	16,96	17,26	0,2121	
2150-400	130	4,58	11,87	5,1548	165,37
	600	21,14	24,01	2,0294	

Através dos resultados obtidos nota-se que para a rota de redução não clássica, 2150μm – 300μm para fios UHT, o valor de intensidade medido, 165,37 A, se aproxima do valor máximo, 168 A, que pode ser fornecido pelo motor e variador presentes na máquina, sendo assim, o ponto inicial de funcionamento da máquina para esta rota de redução de diâmetro é crítico na fabricação de fios UHT.

Ademais, durante os experimentos houve uma grande dificuldade em iniciar a trefilação desses fios, foi necessária a intervenção de um operador de máquinas para dar início ao experimento. Esta dificuldade traduz-se pela descontinuidade de velocidades de produção nas medições realizadas entre 10:53h e 10:58h, quando ocorreu uma parada na produção e o operador interviu.

Para que as condições de trefilação úmida fossem mais semelhantes entre as diferentes rotas de redução de diâmetro testadas, os fios apresentavam resistências mecânicas iniciais de: 1410 MPa para as rotas 1750 μm – 300 μm e 1440 MPa para as rotas 2150 μm – 300 μm e 2150 μm – 400 μm.

6.1.3. Velocidade de produção

Para avaliar a influência da velocidade de produção dos fios trefilados foram usados fios apresentando: a mesma rota de redução de diâmetro (1750 – 300 μm), o mesmo conjunto de fieiras (reto UFTP) e a mesma resistência mecânica inicial de 1410 MPa. Na Tabela 6.4 há os valores de potência útil calculados e medidos para quatro diferentes velocidades de produção, sendo que, a velocidade de produção industrial superior ou igual a 400m/min.

Tabela 6.4 – Influência da velocidade de trefilação para uma mesma rota de redução de diâmetro e mesmo conjunto de fieiras.

Rota de redução	Velocidade de produção (m/min)	Potência calculada (KW)	Potência medida (KW)	Intensidade medida (A)
1750-300 μm	130	2,85	5,12	45,9
	480	10,52	11,87	68,1
	600	13,15	14,57	65,2
	700	15,35	16,99	65,6

Os valores calculados e medidos experimentalmente não são equivalentes, sendo assim, é possível que os cálculos desprezem alguma condição especial decorrente da intereção entre a velocidade de produção e a produção dos fios.

Entretanto, nota-se a existência de uma relação linear Figura 6.3 entre velocidade e potência útil da máquina, já que com o aumento daquela, a potência útil necessária para a realização do processo também aumentou. Esse fato pode ser confirmado pelo modelo aplicado na simulação dos esforços de trefilação úmida que considera a potência útil como uma função dos esforços de trefilação realizados e a velocidade com que os fenômenos de deformação e fricção acontecem.

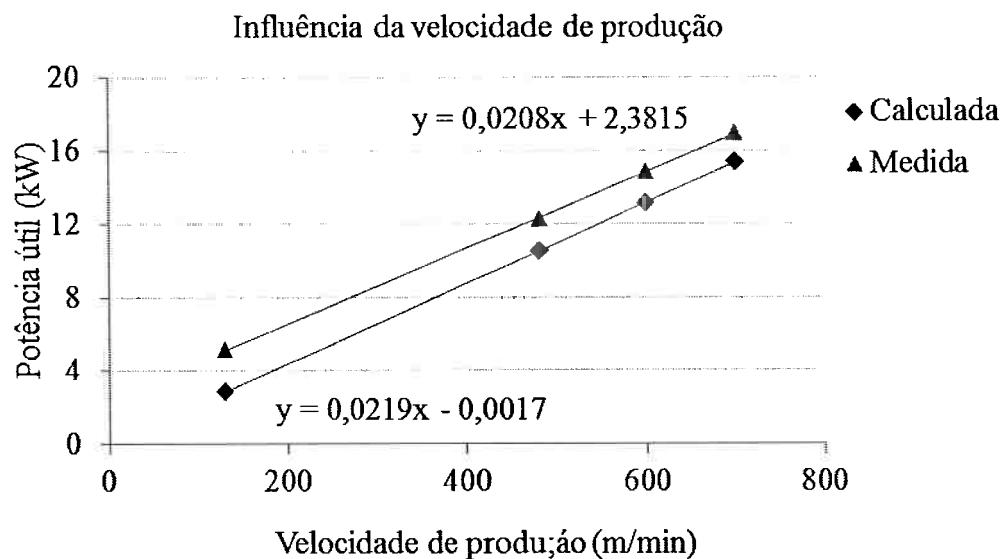


Figura 6.3 – Relação linear entre velocidade de produção e potência útil consumida na trefilação.

6.2. Capacidade dos fios de aço em formar cabos metálicos

6.2.1. Teste de torção simples

Este teste possibilita a correlação entre o comportamento do fio durante a fabricação dos cabos metálicos e suas seguintes propriedades: teor de carbono presente no aço, o tempo de envelhecimento T_{env} ao qual é submetido e consequentemente a resistência mecânica do fio após envelhecimento. O teste também possibilita a correlação entre o comportamento do fio e as tensões empregadas durante o desenrolamento das bobinas dos fios são diferentes.

6.2.1.1. Efeito do teor de carbono e envelhecimento do fio

Nesse teste foram utilizados fios com dois teores distintos de carbono, de 0,9% e 1%. Esses fios apresentavam resistências mecânicas diferentes, além de tempos de envelhecimento distintos, com T_{env} igual à zero – fios testados em até 24 horas após trefilação úmida – ou com T_{env} equivalente a 1h a 150°C em estufa.

O teor de carbono presente no aço está intimamente relacionado à microestrutura do material por consequência à resistência mecânica do fio, sendo assim, fios a 1,0% de carbono apresentam resistência mecânica maior que fios a 0,9%.

Os fios foram submetidos aos testes de torção simples em laboratório (Anexos) e na máquina protótipo. Em laboratório é medido o nível de torção máximo ao qual o fio pode ser submetido, ou seja, quantas torções simples ele pode realizar sem sofrer ruptura. Na máquina protótipo é estabelecido um determinado nível de torções por metro e quando a ruptura ocorre considera-se que esta quantidade de torções às quais o fio é submetido representa o nível máximo de torções simples que o fio suporta realizar durante a fabricação de um cabo metálico naquela máquina.

A Tabela 6.5 apresenta em \checkmark , os níveis de torções nos quais os fios não sofrem rupturas durante o teste e em \times , os níveis de torção nos quais os fios não são aprovados no teste devido a grande quantidade de rupturas obtidas durante a fabricação do cabo metálico.

Tabela 6.5 – Efeito do teor de carbono do aço sobre o nível de torção do fio.

Teor de carbono	T _{env}	R _{mf} (MPa)	Nível de torção Laboratório (rt/m)	Nível de torção Máquina (rt/m)				
				100	125	170	250	500
0,9%	0	3305	866	✓	✓	✓	✓	✓
		3343	866	✓	✓	✓	✓	✓
	1h	3560	533	✓	✓	✓	✓	✗
	150°C	3579	733	✓	✓	✓	✓	✗
1,0%	0	3476	733	✓	✓	✓	✓	✓
		3570	600	✓	✓	✓	✓	✗
	1h	3735	833	✓	✓	✓	✗	✗
	150°C	3750	600	✓	✓	✗	✗	✗

Para um mesmo teor de carbono, o envelhecimento do fio em estufa promove um aumento de sua resistência mecânica e uma perda de ductilidade e tenacidade, devido à esse efeito, os fios à 0,9% de carbono envelhecidos não são capazes de suportar níveis de torção iguais ou superiores a 500 rt/m e os fios a 1% de carbono de suportar 250 rt/m, mostrando que um teor de carbono maior e envelhecimento do fio em estufa alteram o comportamento do fio quando imposto a torções simples.

A partir da Tabela 6.5 nota-se que os níveis de torção simples às quais o fio pode ser submetido sem sofrer rupturas é significativamente maior nos testes realizados em laboratório do que nos testes realizados na máquina protótipo. Esse fato revela que somente com os testes em laboratório não é possível determinar o comportamento do fio durante a fabricação de cabos metálicos em máquinas industriais. Dessa maneira, os resultados dos testes em máquina protótipo determinam um comportamento do fio mais próximo ao comportamento real, sendo uma ferramenta de estudo mais adequada.

Outra informação que deve ser considerada é o nível de torção máximo ao qual os fios são submetidos na máquina industrial. Esse nível corresponde a 130 rt/m e como resultado, todos os fios testados acima apresentaram o mesmo comportamento quando testados na máquina industrial, sem que houvesse nenhuma ruptura durante toda a fabricação.

Portanto, o teor de carbono influencia diretamente no nível de torção ao qual o fio pode ser submetido durante os testes de torção simples realizados em máquina protótipo.

6.2.1.2. Efeito do conjunto de fieiras

O tipo de conjunto de fieiras utilizado utilizado exerce papel de grande importância no comportamento do fio ao longo da fabricação de cabos metálicos, sendo um fator determinante para a escolha das condições de trefilação empregadas no processo.

A Tabela 6.6 apresenta os resultados obtidos para os testes realizados com dois conjuntos de fieiras ligeiramente diferentes, sendo um deles o reto e o outro reto UFTP. Os fios apresentavam mesmo teor de carbono (0,9%) em sua composição.

Tabela 6.6 – Efeito do conjunto de fieiras sobre o comportamento do fio nos testes de torção simples.

Conjunto de fieiras	T_{env}	R_{m_f} (MPa)	Nível de torção		Nível de torção Máquina				
			Laboratório (rt/m)		100	125	170	250	500
Reta UFTP	0	3305	866		✓	✓	✓	✓	✓
	1h 150°C	3560	533		✓	✓	✓	✓	✗
Reta	0	3434	500		✓	✓	✓	✓	✓
	1h 150°C	3598	800		✗	✗	✗	✗	✗

Os resultados obtidos ao longo desses testes mostram que a presença da última fieira com taxa de redução de diâmetro pequena não causa impactos significativos no comportamento dos fios com T_{env} igual à zero, contudo, para os fios envelhecidos em estufa, essa ligeira diferença entre os conjuntos de fieiras de trefilação determina a capacidade desses fios em formarem cabos metálicos. Além disso, o conjunto de fieiras empregado na trefilação também interferem na resistência mecânica obtida após trefilação úmida, por exemplo, os fios trefilados pelo conjunto reto de fieiras apresentaram valores de resistência mecânica maiores, tanto para os fios não envelhecidos como para os envelhecidos em estufa.

Esse fato pode ser verificado comparando-se os níveis de torções aos quais os dois fios envelhecidos suportaram. Para o conjunto de fieiras sem a última fieira com taxa de redução pequena, o nível máximo de torções ao qual ele pode ser submetido é inferior a 100 rt/m sendo considerado um nível muito baixo, o que representa uma capacidade reduzida em formar cabos metálicos. Este comportamento revela que as taxas de redução de diâmetro às quais o fio é submetido ao longo da trefilação úmida influenciam nas propriedades mecânicas do fio e em seu comportamento durante a formação de cabos metálicos.

Esses fios também foram testados na máquina industrial de fabricação de cabos metálicos e apresentaram mcomportamento similar, ou seja, os fios a tempo zero não sofreram rupturas ao longo do processo, já os fios envelhecidos em estufa e trefilados com conjunto de fieiras sem UFTP sequer formaram um metro de cabo metálico, dessa forma, foram considerados inadequados para a fabricação industrial de cabos.

6.2.1.3. Efeito das tensões de desenrolamento das bobinas

Um segundo tipo de teste foi realizado para avaliar a influênciia das tensões de desenrolamento do fio no processo de fabricação de cabos metálicos, já que, a tensão é a única solicitação que pode ser controlada e quantificada durante o processo.

Esse teste foi realizado em condições análogas aos testes de torção simples descritos anteriormente porém, as tensões de desenrolamento de bobinas de alimentação foram modificadas e variaram entre os valores mínimo e máximo, respectivamente 3,5 daN e 7daN. A Tabela 6.7 mostra os resultados obtidos no teste de torção simples para diferentes tensões de desenrolamento das bobinas.

Tabela 6.7 – Teste de torção simples empregando diferentes tensões de desenrolamento das bobinas de fios envelhecidos em estufa à 1h e 150°C.

Teor de Carbono	Rm _f (MPa)	Nível de torção Laboratório (rt/m)	Tensão (daN)	Nível de torção Máquina (rt/m)				
				100	125	170	250	500
0,9%	3579	733	3,5	✓	✓	✓	✓	✗
			4,0	✓	✓	✓	✓	✗
			5,0	✓	✓	✓	✓	✗
			6,0	✓	✓	✓	✓	✗
			7,0	✓	✓	✓	✓	✗
1,0%	3735	833	3,5	✓	✓	✓	✗	✗
			4,0	✓	✓	✓	✗	✗
			5,0	✓	✓	✓	✗	✗
			6,0	✓	✓	✓	✗	✗
			7,0	✓	✓	✓	✗	✗

Os resultados obtidos mostram que as tensões de desenrolamento das bobinas não são fatores limitantes na capacidade dos fios em formarem cabos metálicos pois os fios apresentaram mesmo comportamento, ou seja, mesmos níveis de torção máximos para diferentes tensões de desenrolamento dos fios empregadas.

6.2.2. Teste de torção-distorção

Os testes de torção e distorção (Tabela 6.8) foram realizados para fios com mesmo teor de carbono (0,9%) utilizando mesma tensão de desenrolamento das bobinas a 1,75daN, valor inferior ao empregado nos testes de torção simples pois é um teste mais severo, já que, adiciona ao fio a solicitação de distorção. Contudo, nas máquinas industriais não existe essa solicitação adicional, logo, esses testes não são frequentemente utilizados.

Tabela 6.8 – Testes de torção e distorção em máquina protótipo.

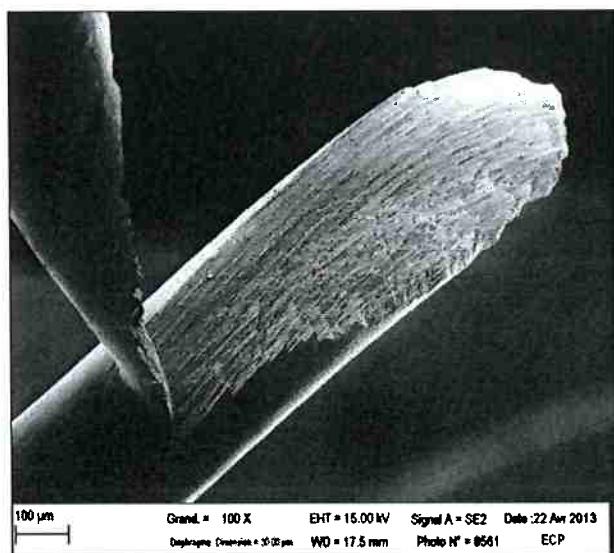
Teor de carbono	T_{env}	Rm(MPa)	Nível de torção		Nível de torção Máquina			
			Laboratório (rt/m)	100	125	170	250	500
0,9%	1h 150°C	3305	866	✓	✓	✓	✓	✗
		3343	866	✓	✓	✓	✓	✗
		3560	533	✓	✓	✗	✗	✗
		3579	733	✓	✓	✓	✗	✗

Os resultados obtidos confirmam que os testes que aplicam torção simples e distorção nos fios durante a fabricação de cabos metálicos são mais severos que os testes realizados apenas empregando-se torções simples – a comparação pode ser feita com os dados presentes na Tabela 6.5.

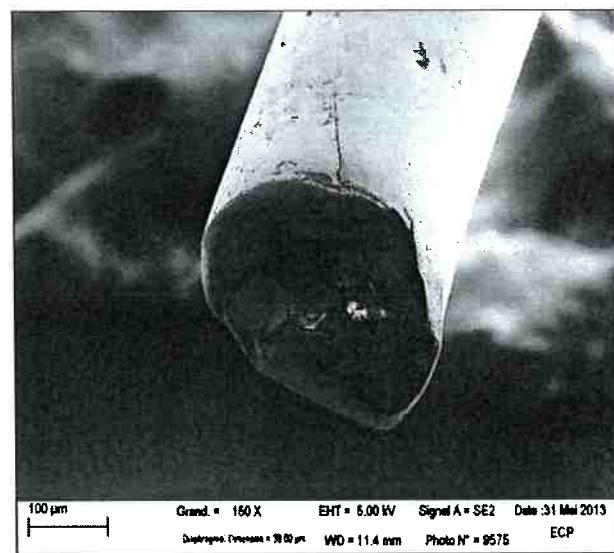
6.2.3. Análise das rupturas provenientes dos testes de torção simples

A capacidade do fio em formar cabos metálicos é definida pela quantidade de rupturas obtidas durante o teste. Para que a fabricação do cabo metálico seja considerada industrialmente possível, o número máximo de rupturas obtidas ao longo do teste não deve ultrapassar cinco. Durante os testes, diversas amostras de rupturas foram enviadas para

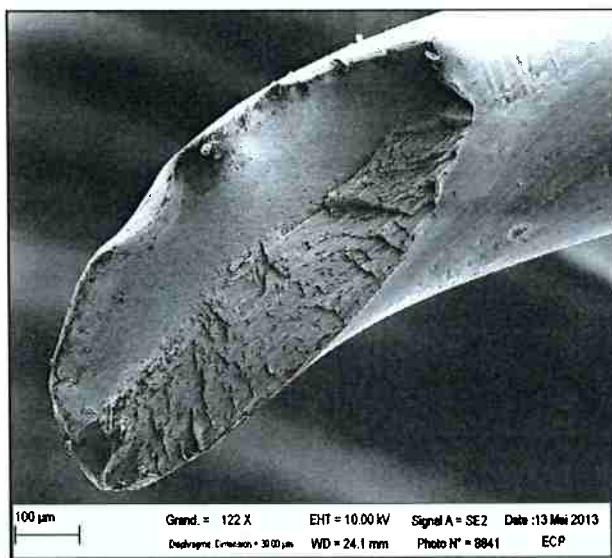
análise em laboratório. Na Figura 6.4 estão representadas algumas rupturas de fios provenientes de mecanismos de ruptura distintos.



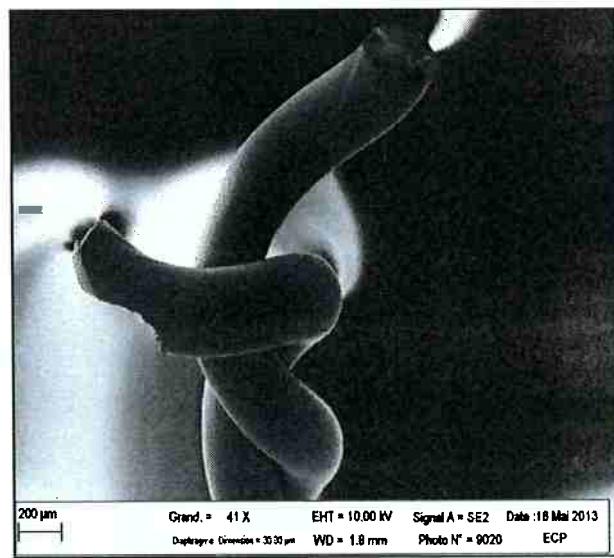
a) Ruptura longitudinal.



b) Rupture cônica.



c) Rupture longitudinal frágil e dúctil.



d) Ruptura de um cabo metálico formado por dois fios de aço.

Figura 6.4 – Exemplos de rupturas provenientes dos testes de torção simples realizados na máquina protótipo.

O tipo de ruptura mais frequentemente observado é por delaminação. Essas rupturas podem ter suas origens:

- Na localização de torções devido à presença de defeitos superficiais no material que podem ter sido gerados em todas as etapas precedentes do processo;
- Na presença de trincas transversais que podem ter sido geradas ao longo do processo de trefilação úmida e;
- Na delaminação do aço provocada pelos esforços de trefilação durante a trefilação úmida.

As rupturas cônicas se iniciam a partir de decoesões centrais no material. São resultantes de uma diferença de encruamento no metal entre seu interior e a parte superficial durante a deformação plástica. As origens deste tipo de ruptura podem ser:

- A presença de inclusões ou segregação no aço;
- A criação de decoesões durante a trefilação seca, onde a estrutura obtida após o tratamento térmico não é adequada (presença de perlita globulizada);
- A deterioração da superfície do fio durante a etapa de revestimento e;
- A danificação da microestrutura do fio, em seu interior ou na superfície, ao longo do processo de trefilação úmida.

6.3. Avaliação dos limites de fabricação dos cabos metálicos

Para esta avaliação foram construídas duas cartografias contendo os valores teóricos, obtidos por cálculos que simulam as condições do processo, de tensões resultantes e de tensões de desenrolamento das bobinas dos fios de alimentação, além dos limites de fabricação estabelecidos pela geometria da máquina utilizada e por limites de segurança que são primordiais na produção em escala industrial.

As cartografias com as tensões permitem uma avaliação inicial dos atuais limites do processo de fabricação de cabos metálicos formados por fios UHT de grande diâmetro. Essa avaliação está relacionada com o sistema de desenrolamento das bobinas de alimentação e das características geométricas da máquina.

A máquina que fabrica cabos metálicos atua com tensões de desenrolamento de bobinas inferiores a 3,5daN para que não haja sobrecarga de solicitações no fio e portanto evitando a ocorrência de rupturas durante o processo.

Além desse limite de fabricação, as características geométricas da máquina determinam a altura máxima que o semi-arco de cabo metálico pode formar, consequentemente, elas determinam a tensão resultante máxima que o cabo pode assumir. Dessa forma, a altura do semi-arco formado pelo cabo metálico deve ser inferior a altura da recepção da máquina. Sendo assim, a tensão resultante limita as características como o diâmetro e a arquitetura dos cabos metálicos que podem ser fabricados pelo processo utilizado atualmente.

Os resultados obtidos foram separados levam em consideração as condições de fabricação de cabos metálicos formados por duas e três camadas, para os fios de diâmetros que variam entre 0,35 e 0,45mm nas diferentes velocidades de produção: 3000m/min, 3500m/min e 4000m/min. A partir das informações coletadas foi construída a Tabela 6.9 para a identificação dos processos cuja realização é viável considerando os limites do processo: altura do semi-arco do cabo, tensão máxima de desenrolamento das bobinas, velocidade de produção, diâmetro dos fios utilizados e arquitetura do cabo metálico que será formado. Em **X** os cabos que não podem ser fabricados, em **O**, os cabos que podem ser fabricados com alguma dificuldade e em **✓** os cabos facilmente fabricáveis.

Tabela 6.9 – Síntese dos limites atuais de fabricação de cabos metálicos relacionados aos parâmetros do processo e aos equipamentos utilizados.

		Arquitetura do cabo metálico						
Velocidade produção (m/min)	Diâmetro do fio (mm)	1+6	2+7	3+9	1+6+12	3+9+15	4+10+16	
		0,45	X	X	X	X	X	X
4000	0,40	X	X	X	X	X	X	X
	0,35	X	X	X	X	X	X	X
	0,45	X	O	X	X	X	X	X
3500	0,40	O	✓	X	X	X	X	X
	0,35	O	✓	X	X	X	X	X
	0,45	✓	✓	✓	X	X	X	X
3000	0,40	✓	✓	✓	X	X	X	X
	0,35	✓	✓	✓	✓	X	X	X

Os resultados mostram que atualmente há uma impossibilidade em produzir industrialmente cabos de grande diâmetro a velocidade de 4000m/min e que o processo não é adequado para cabos formados por fios UHT de grande diâmetro (acima de 0,40 mm) e que apresentem quantidade de fios superior a nove.

7. CONCLUSÃO

Os diferentes estudos realizados ao longo desse trabalho permitiram a avaliação de alguns limites do processo de fabricação de cabos metálicos compostos por fios de aço UHT e de grande diâmetro.

O *software* de simulação de esforços de trefilação úmida foi aperfeiçoado e contribui para a análise dos parâmetros do processo e de suas influências sobre os equipamentos utilizados nessa etapa de transformação dos fios de aço. Além disso, os cálculos teóricos foram complementados através dos resultados obtidos a partir de testes realizados na máquina de trefilação.

Os cálculos demonstraram que as máquinas de trefilação úmida são capazes de produzir normalmente fios HT e SHT, porém existe uma grande dificuldade, em termos da intensidade com a qual o motor da máquina funciona, para a fabricação de fios de aço UHT de grande diâmetro ($400 \mu\text{m}$) a partir de rotas de redução de diâmetro com diâmetro inicial equivalente a $2150 \mu\text{m}$ e que apresentem valores de resistência mecânica maiores em relação aos fios que são trefilados utilizando rotas de redução clássicas.

Para superar essa dificuldade encontrada, é proposta a aquisição de um novo motor que se adeque a máquina de trefilação úmida e possibilite o fornecimento da potência e intensidade necessárias para o processo de elaboração dos fios de aço trefilados. Para tanto, será necessária a realização de um dimensionamento mecânico e elétrico para o novo equipamento a ser empregado. Além disso, como foi observado neste trabalho, o conjunto de fieiras tem influência significativa no comportamento dos fios ao longo da fabricação de cabos metálicos, sendo assim, devem ser propostas novas formas de concepção de conjuntos de fieiras de trefilação pois sabe-se que existe uma correlação entre as propriedades dos fios obtidas na trefilação úmida e a capacidade dos fios em formarem cabos metálicos.

O compromisso entre as propriedades microestruturais dos fios de aço e seus comportamentos durante a fabricação de cabos metálicos foi estudado através dos testes realizados nas máquinas protótipo e industriais. Eles permitiram o estudo da capacidade de diferentes fios de aço em formarem os cabos metálicos em diversas condições do processo de fabricação. Os resultados obtidos validam a utilização dos testes de torção simples como os testes mais rápidos e eficazes para a avaliação do comportamento dos fios trefilados ao longo do processo de fabricação dos cabos metálicos.

Considerando a avaliação das condições de fabricação de cabos metálicos, as cartografias apresentando os limites de tensões de desenrolamento das bobinas de alimentação e os limites geométricos da máquina utilizada, possibilitam a identificação dos cabos metálicos que podem ser fabricados utilizando-se os equipamentos e as condições do processo disponíveis atualmente.

As cartografias mostram que existem diversos pontos críticos e obstáculos na fabricação de cabos metálicos formados por fios de aço UHT e de grande diâmetro e que portanto, é necessário o desenvolvimento de novas ferramentas e equipamentos que possibilitem um aperfeiçoamento e uma adequação do atual processo para que seja possível integrar os novos cabos metálicos nos pneus mais tecnológicos. Como por exemplo, o desenvolvimento de um novo sistema de desenrolamento de bobinas de alimentação.

O estudo realizado durante esse trabalho de formatura contribuiu para a identificação e avaliação dos parâmetros e características dos processos de trefilação úmida e de fabricação de cabos metálicos, baseando-se em uma análise mecânica teórica e experimental dos processos através do uso de modelos matemáticos de simulação dos fenômenos que ocorrem durante a elaboração dos fios de aço e cabos metálicos e também de testes que correlacionam as propriedades microestruturais dos fios obtidas na trefilação com o comportamento dos fios ao longo da fabricação de cabos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] Goodyear, “As origens da Goodyear,” 2011. [Online]. Available: <http://www.goodyear.com.br/empresa/goodyear-mundo/goodyear-mundo.html>. [Acesso em 2013].
- [2] Michelin, “Saiba mais sobre a Michelin,” 2013. [Online]. Available: <http://www.michelin.com.br/sobre-nos/a-empresa.html>. [Acesso em 2013].
- [3] “Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos,” [Online]. Available: <http://www.anip.com.br/>. [Acesso em 2013].
- [4] J. Sarney Filho e J. C. Carvalho, “RESOLUÇÃO Nº 258, DE 26 DE AGOSTO DE 1999,” CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA, [Online]. Available: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res99/res25899.html>.
- [5] M. Goldenstein, M. de Figueiredo Alves e M. Toniolo Barros, “Panorama da indústria de pneus no Brasil: ciclo de investimentos, novos competidores e a questão do descarte de pneus inservíveis,” *BNDES Setorial*, n. 25, pp. 107-130, 2007.
- [6] “Saiba como é um pneu por dentro,” Manufatura Francesa de Pneus Michelin, 2013. [Online]. Available: <http://www.michelin.com.br/tudo-sobre-carros/Conheca-seu-pneu/Curiosidade-saiba-como-e-um-pneu-por-dentro>.
- [7] Pirelli, “Pirelli Responde,” Pirelli, [Online]. Available: <http://www.pirelliclubtruck.com.br/revistaclubtruck/revista/truck08/presponde.html>. [Acesso em 2013].
- [8] “Pneu Radial versus Pneu Diagonal,” Michelin, [Online]. Available: <http://www.michelin-pneu-agricole.fr/Innover/Pneu-Radial-Versus-Diagonal>. [Acesso em 2013].

- [9] Michelin, “Processo de Fabricação,” 2013. [Online]. Available: http://www.michelinearthmover.com/por_br/Pagina-inicial/Pneus/Por-que-escolher-a-MICELIN/Processo-de-fabricacao.
- [10] Michelin, “Procéder de fabrication des renforts métalliques chez Michelin”.
- [11] P. Fernandes Lopes, “Limites d’élaboration des renforts métalliques pour les pneumatiques,” Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Paris, 2013.
- [12] A. Lefort, “Tréfilage de l’acier,” 2010.
- [13] V. Chiaverini, Aços-Carbono e Aços-Liga: Característicos gerais, Tratamentos Térmicos e principais Tipos, São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 1959.
- [14] C. Maury, “Etude du comportement, de l’endommagement et de la rupture en torsion des aciers perlitiques fortement tréfilés,” 2008.
- [15] B. Goes, A. Martín-Meizoso, J. Gil-Sevillano , I. Lefever e E. Aernoudt , “Fragmentation of as-drawn pearlitic steel wires during torsion tests,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 60, pp. 255-272, 1998.
- [16] J. Toribio e A. Valiente, “Approximate evaluation of directional toughness in heavily drawn pearlitic steels,” *Materials Letters*, vol. 58, pp. 3514-3517, 2004.
- [17] K. M. Mahmoud, “Fracture strength for a high strength steel bridge cable wire with a surface crack,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 48, pp. 152-160, 2007.
- [18] K. Susaki, *Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico*, Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008.

- [19] H. Tashiro, *Nippon Steel Corporation*, 1999.
- [20] M. Zelin, “Microstructure evolution in pearlitic steels during wire drawing,” *Acta Materialia*, 2002.
- [21] E. O. Hall, “The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results,” *Proc. Phys. Soc*, n. B64, 1951.
- [22] N. I. Petch, *J. Iron Steel Inst*, vol. 174, n. 25, 1953.
- [23] H.-C. Choi e K.-T. Park, “The effect of carbon content on the Hall-Petch parameter in the cold drawn hypereutectoid steels,” *Scripta Materialia*, vol. 34, n. 6, pp. 857-862, 1996.
- [24] J. William D. Callister, Ciência e Engenharia de Materiais, 5^a éd., Department of Metallurgical Engineering, 2002, p. 120.
- [25] G. Simonnet, “Tréfilage de l’acier M645,” *Traité des matériaux métalliques, Techniques de l’Ingénieur*, 1996.
- [26] A. Alvarenga Palmeira, “Processos de Trefilação,” 2005.
- [27] H. Fay, “Films Lubrifiants Supramoléculaires Organisés: de la Microstructure aux Propriétés Tribologiques,” L’université Bordeaux 1, 2011.
- [28] E. Siebel e M. Bonzel, “Le tréfilage de l’acier,” Dunod, 1958.
- [29] R. e. R. G. J. Johnson, vol. 96, Inst.Met, 1968, p. 97.
- [30] B. Avitzur, “Metal Forming: process and analysis,” McGraw-Hill Book Company.

- [31] C. Levrau, “Compréhension et modélisations des mécanismes de lubrification lors du tréfilage des aciers inoxydables avec les savons secs,” Ecole Nationale Supérieure de Mines de Paris, 2006.
- [32] J. A. Schey, *Tribology in metalworking: Friction, lubrication and wear*, American society for metals, 1983.
- [33] G. H. A. e. I. A. Vega, “Temperature effects on wire drawing process: experimental investigation,” *International Journal of material forming*.
- [34] M. Grumbach, “Vieillissement des aciers”.
- [35] P. Sallet, “Mise en place de nouvelles conditions de tréfilage humide sur un fil unitaire en vue de sa mise en assemblage,” 2012.
- [36] “Tudo sobre pneus,” [Online]. Available: <http://www.braziltires.com.br/tudosobrempneus/pneus.html>. [Acesso em 2013].
- [37] C. Genin, “Optimisation de systèmes colloïdaux en phase aqueuse pour la lubrification en conditions extrêmes : application au tréfilage,” Ecole Centrale de Lyon, 2007.

ANEXO

O teste de torção em laboratório consiste em medir o número de torções que o fio pode realizar, ao longo de um dado comprimento, antes de romper-se. Durante este ensaio é importante assegurar que o fio não apresentará localizações ao longo das torções. Estas localizações são prejudiciais para o fio e interferem na capacidade dele em formar cabos metálicos já que, ao longo do processo de fabricação, as solicitações a quais o fio será submetido irão se localizar em uma única ergião do fio, facilitando a ocorrência de rupturas.

As medidas realizadas servem como um primeiro indicador da capacidade do fio em formar cabos metálicos, porém, como as solicitações impostas ao fio durante este teste são distintas das reais solicitações ao longo do processo de fabricação, estes testes em laboratório não são suficientes para determinar a aptidão dos fios metálicos em formar cabos. A figura abaixo ilustra um exemplo de curva de torções obtidas num dos ensaios realizados em laboratório, para o mesmo fio apresentando níveis de encruamento diferentes, obtidos após passagem do fio por algumas fíeiras ao longo da trefilação úmida.

