

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA MECÂNICA
JEAN PESTILE PEREIRA CORREA

**EFEITO DO TRABALHO A FRIO NOS ESFORÇOS RESISTENTES DE CÁLCULO
A TRAÇÃO E COMPRESSÃO EM PERFIS U SIMPLES FORMADOS A FRIO**

Varginha
2018

JEAN PESTILE PEREIRA CORREA

**EFEITO DO TRABALHO A FRIO NOS ESFORÇOS RESISTENTES DE CÁLCULO
A TRAÇÃO E COMPRESSÃO EM PERFIS U SIMPLES FORMADOS A FRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas para obtenção do grau de bacharel sob orientação do professor Esp. Matheus Henrique Pereira.

Varginha

2018

JEAN PESTILE PEREIRA CORREA

**EFEITO DO TRABALHO A FRIO NOS ESFORÇOS RESISTENTES DE CÁLCULO
A TRAÇÃO E COMPRESSÃO EM PERFIS U SIMPLES FORMADOS A FRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em / /

Prof.

Prof.

Prof.

OBS:

Dedico este trabalho à minha família, meus pais, minha irmã, minha noiva e todos aqueles que de alguma forma contribuíram para sua conclusão.

AGRADECIMENTOS

Após tanto estudo, esforço, madrugadas em claro, finais de semana dedicados ao estudo, posso dizer que conquistei mais uma vitória. Agradeço a todos que compartilharam comigo esta etapa importante da vida, dedico a familiares e amigos os resultados do objetivo alcançado. Agradeço primeiramente a Deus, por esta vida abençoada e pela oportunidade de realizar um sonho. Agradecimento especial aos meus pais, Geanne e José Carlos, que me educaram com muito amor sempre pautados no respeito para com o próximo, com resiliência souberam acolher minhas hesitações e com conselhos e autenticidade me permitiram sempre doar o melhor de mim; minha irmã Gennifher, pelo companheirismo e apoio incondicional em todos os momentos e; minha noiva, Mariana, pelo carinho, pelo coração maior do mundo que renova minhas energias e pela paciência quando passava várias horas na frente do computador e dos livros não dando a devida atenção que merecia. Às amigas de longa data, do colégio e da cidade, e as conquistadas ao longo dessa trajetória, ressalto como foram importantes e contribuíram na minha formação como profissional e como melhor ser humano. Agradecimento ao professor orientador Matheus cujas instruções e conselhos permitiram a elaboração e conclusão deste trabalho. Aos professores e mestres que se tornaram referência e exemplo na profissão de Engenheiro Mecânico. Ainda que não seja possível, agradeceria cada pessoa individualmente que no olhar ou com simples palavras me deram força e abriram caminhos para eu levar a diante meus ensejos.

Não poderia deixar de mencionar a importância do esporte nesta conquista. Desde os 6 anos de idade praticava a modalidade de Ciclismo BMX e grande parte da minha vida foi dedicada aos estudos e à prática esportiva concomitantemente. Fazia muitos treinos, viagens, competições e com eles, vieram muitas vitórias e derrotas. Aprendi a respeitar os adversários que mais tarde se tornaram grandes amigos. Aprendi que nenhuma conquista cai do céu, você precisa lutar para consegui-la, sem esforço e dedicação não se consegue atingir os objetivos. Tudo depende de como você encara e leva a sério os desafios e obstáculos da vida.

Como diz Bernardinho: “A vontade de se preparar tem que ser maior que a vontade de vencer. Vencer será consequência da boa preparação”. Posso dizer que, com o apoio de todos mencionados acima, coloquei em prática esta atitude. A vontade de estudar, entender as matérias e absorver o conhecimento, que na engenharia não é tão simples, era maior que a vontade de obter notas boas, passar de semestre, e não ficar de DP. Foram apenas as consequências da minha dedicação.

Hoje, através deste trabalho, tenho a oportunidade de tornar-me Engenheiro Mecânico, profissão que aprendi admirar desde pequeno, intrigado com os carros que passavam pelas ruas e que desenhava em meus cadernos de escola, com os programas sobre engenharia que assistia na televisão. Sou apaixonado por essa profissão e vou utilizar de suas ferramentas para melhorar a vida das pessoas.

RESUMO

Perfis fabricados por deformação a frio sofrem alterações em suas propriedades. Dentre as várias alterações, as que têm maior destaque são as que ocorrem nas propriedades mecânicas, como a tensão de escoamento do aço. O trabalho a frio pode proporcionar significativo aumento na resistência ao escoamento na tração e na compressão. Estas alterações ocorrem, principalmente devido ao encruamento e ao envelhecimento do material quando submetido a uma deformação plástica. A espessura da chapa, características geométricas dos perfis, raio interno de dobra, ângulo de dobramento e a quantidade de dobras do perfil são os principais fatores que influenciam nas modificações de propriedades dos perfis formados a frio. Sendo assim, este trabalho tem como o objeto de estudo a análise dos efeitos do processo de fabricação dos perfis formados a frio na performance desses elementos quando utilizados em estruturas de aço. Tais efeitos serão avaliados em perfis U simples quando submetidos aos esforços de tração e compressão, considerando os requisitos das normas que regulamentam o dimensionamento desse tipo de perfil, ou seja, de acordo com as normas NBR6355:2012 e NBR14762:2010. Serão apresentados os gráficos dos esforços resistentes de cálculo para tração e compressão de todos os 125 perfis U simples formados a frio normatizados pela NBR6355:2012, como também os gráficos mostrando o efeito do trabalho a frio na resistência desses perfis. Análises complementares de metalografia serão apresentadas, considerando uma amostra de perfil U de 150x40x4,75 fabricado com chapa de aço carbono CST COR 400, para entender algumas mudanças básicas que a deformação a frio promove na estrutura micrográfica do perfil. Com isso, será apresentado o nível de influência do trabalho a frio para cada tipo de série dos perfis U simples e para cada tipo de esforço. Diante disso, será apresentado que a tensão de escoamento dos perfis U simples tem um aumento médio de 8% devido ao efeito do trabalho a frio. A influência do trabalho a frio proporciona diferentes comportamentos quando se compara solicitações de tração e compressão. Em média, o esforço resistente de cálculo a tração também possui um aumento de 8%. Porém, para barras comprimidas, o comprimento influencia diretamente neste acréscimo. Considerando 0,1 metro de comprimento, o esforço resistente de cálculo a compressão aumenta em 11%, na média. Entretanto, com 2,5 metros esse valor cai para 2%.

Palavras-chave: Efeito do trabalho a frio. Perfil U simples. Tração. Compressão.

ABSTRACT

Profiles manufactured by cold-working undergo changes in their properties. Among the several alterations, the ones that have more importance are those that occur in the mechanical properties, such as the yield stress. Cold-working can provide significant increase in tensile and compressive yield stress. These changes occur mainly due to the strain hardening and strain aging of the material when subjected to a plastic deformation. The sheet thickness, geometric characteristics of the profiles, internal bend radius, folding angle and the number of profile folds are the main factors that influence the modifications of properties of the cold formed profiles. Thus, this work has the objective of analyzing the effects of the cold-formed profiles on the performance of these elements when used in steel structures. These effects will be evaluated considering C-Channel profiles when subjected to tensile and compressive stress, considering the requirements of Brazilian standards that regulate the designing of this type of profile, that is, according to the standards NBR6355:2012 and NBR14762: 2010. The graphs of the resistance strength of all 125 simple cold formed C-Channel profiles will be presented, as well as the graphs showing the effect of cold-working on the strength of these profiles. Supplementary metallographic analysis will be presented, considering a sample of profile U of 150x40x4,75 manufactured with CST COR 400 carbon steel plate, to understand some basic changes that cold-working promotes in the micrographic structure of the profiles. Thus, it will be presented the level of influence of the cold work for each type of C-Channel profiles and for each type of effort. Giving that, it will be presented that the yield stress of C-Channel profiles has an average increase of 8% due to the effect of cold working. The influence of cold-working provides different behaviors when comparing tensile and compression efforts. On average, the tensile resistance strength also has an increase of 8%. However, for compressed members, the length directly influences this increase. Considering 0.1 meter of length, the compressive resistance strength increases by 11% on average. At 2.5 meters, this value drops to 2%.

Keywords: *Effects of cold-working. C-Channel profiles. Tensile strength. Compressive strength.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfis estruturais formados a frio.....	23
Figura 2 -Tipos de elementos componentes de perfis formados a frio.....	25
Figura 3 - Chapas finas de aço especificadas por normas brasileiras para uso estrutural....	26
Figura 4 - Séries comerciais mais usuais de perfis estruturais e respectivas designações.....	27
Figura 5 - Tipos de processos de dobramento e conformação a frio.....	29
Figura 6 - Regiões analisadas nos perfis U simples em relação ao efeito do trabalho a frio em suas propriedades mecânicas	31
Figura 7 - Efeito do trabalho a frio nas propriedades mecânicas em diferentes regiões dos perfis U simples formados a frio	32
Figura 8 - Efeito do trabalho a frio nas características granulares dos metais	33
Figura 9 - Efeitos do trabalho a frio nas características microestruturais	34
Figura 10 - Efeitos do trabalho a frio nas características tensão-deformação.....	35
Figura 11 - Relação entre f_{yc}/f_y e r_i/t baseados em valores de f_u/f_y	36
Figura 12 - Seção bruta e líquida de perfis tracionados	40
Figura 13 - Modos de flambagem elástica local, distorcional, por flexão e por torção ..	42
Figura 14 - Modo de flambagem local	42
Figura 15 - Modo de flambagem distorcional	43
Figura 16 - Escala das estruturas dos materiais.....	46
Figura 17 - Contornos de grão em esquema bidimensional	47
Figura 18 - Diagrama de equilíbrio de fases Fe-C.....	47
Figura 19 - Relações do tamanho de grão ASTM	48
Figura 20 - Representação básica da ferrita.....	49
Figura 21 - Representação básica da cementita.....	49
Figura 22 - Representação básica de colônias de perlita	50
Figura 23 - Sistemas de iluminação dos microscópicos metalográficos	50
Figura 24 - Representação de uma superfície de aço de baixo teor de carbono após o ataque com Nital (2%).....	52
Figura 25 - Representação básica do algoritmo de cálculo dos esforços resistentes.....	60
Figura 26 - Dobradeira tipo Press-brake	62
Figura 27 - Perfil U 150x40x4,75 dobrado	62

Figura 28 - Definição das regiões para análise metalográfica.....	63
Figura 29 - Amostra para estudo metalográfico	63
Figura 30 - Politriz utilizada na preparação da amostra.....	64
Figura 31 - Lixa metalográfica 120 de carboneto de silício	64
Figura 32 - Condição da amostra após o lixamento com lixa 120	65
Figura 33 - Alumina em suspensão para polimento	65
Figura 34 - Condição da amostra após o polimento	66
Figura 35 - Condição da amostra após o ataque com Nital	66
Figura 36 - Microscópio e computador auxiliar para análise metalográfica	67
Figura 37 - Massa para planificar a amostra.....	67
Figura 38 - Dispositivo de planificação de amostra	68
Figura 39 - Marcação das linhas de contagem para aproximação de 500 vezes	68
Figura 40 - Marcação das linhas de contagem para aproximação de 1000 vezes	69
Figura 41 - Imagem metalográfica da região 1 – porção interna da dobra - aproximação de 500 (a) e 1000 (b) vezes.....	79
Figura 42 - Imagem metalográfica da região 2 – região da metade da espessura - aproximação de 500 (a) e 1000 (b) vezes	79
Figura 43 - Imagem metalográfica da região 3 – porção externa da dobra - aproximação de 500 (a) e 1000 (b) vezes.....	80
Figura D. 1 - Imagem metalográfica da região 1 - porção interna da dobra - aproximação de 25 vezes.....	111
Figura D. 2 - Imagem metalográfica da região 1 - porção interna da dobra - aproximação de 50 vezes.....	112
Figura D. 3 - Imagem metalográfica da região 1 - porção interna da dobra - aproximação de 100 vezes.....	112
Figura D. 4 - Imagem metalográfica da região 1 - porção interna da dobra - aproximação de 200 vezes.....	113
Figura D. 5 - Imagem metalográfica da região 1 - porção interna da dobra - aproximação de 500 vezes.....	113
Figura D. 6 - Imagem metalográfica com marcações da região 1 - porção interna da dobra - aproximação de 500 vezes	114
Figura D. 7 - Imagem metalográfica da região 1 - porção interna da dobra - aproximação de 1000 vezes.....	114

Figura D. 8 - Imagem metalográfica com marcações da região 1 - porção interna da dobra - aproximação de 1000 vezes.....	115
Figura D. 9 - Imagem metalográfica da região 2 - porção mediana da dobra - aproximação de 25 vezes.....	115
Figura D. 10 - Imagem metalográfica da região 2 - porção mediana da dobra - aproximação de 50 vezes.....	116
Figura D. 11 - Imagem metalográfica da região 2 - porção mediana da dobra - aproximação de 100 vezes.....	116
Figura D. 12 - Imagem metalográfica da região 2 - porção mediana da dobra - aproximação de 200 vezes.....	117
Figura D. 13 - Imagem metalográfica da região 2 - porção mediana da dobra - aproximação de 500 vezes.....	117
Figura D. 14 - Imagem metalográfica com marcações da região 2 - porção mediana da dobra - aproximação de 500 vezes.	118
Figura D. 15 - Imagem metalográfica da região 2 - porção mediana da dobra - aproximação de 1000 vezes.....	118
Figura D. 16 - Imagem metalográfica com marcações da região 2 - porção mediana da dobra - aproximação de 1000 vezes	119
Figura D. 17 - Imagem metalográfica da região 3 - porção externa da dobra - aproximação de 25 vezes.....	119
Figura D. 18 - Imagem metalográfica da região 3 - porção externa da dobra - aproximação de 50 vezes.....	120
Figura D. 19 - Imagem metalográfica da região 3 - porção externa da dobra - aproximação de 100 vezes.....	120
Figura D. 20 - Imagem metalográfica da região 3 - porção externa da dobra - aproximação de 200 vezes.....	121
Figura D. 21 - Imagem metalográfica da região 3 - porção externa da dobra - aproximação de 500 vezes.....	121
Figura D. 22 - Imagem metalográfica com marcações da região 3 - porção externa da dobra - aproximação de 500 vezes	122
Figura D. 23 - Imagem metalográfica da região 3 - porção externa da dobra - aproximação de 1000 vezes.....	122
Figura D. 24 - Imagem metalográfica com marcações da região 3 - porção externa da dobra - aproximação de 1000 vezes	123

Figura D. 25 - Imagem metalográfica da região 4 - porção interna da chapa - aproximação de 25 vezes.....	123
Figura D. 26 - Imagem metalográfica da região 4 - porção interna da chapa - aproximação de 50 vezes.....	124
Figura D. 27 - Imagem metalográfica da região 4 - porção interna da chapa - aproximação de 100 vezes.....	124
Figura D. 28 - Imagem metalográfica da região 4 - porção interna da chapa - aproximação de 200 vezes.....	125
Figura D. 29 - Imagem metalográfica da região 4 - porção interna da chapa - aproximação de 500 vezes.....	125
Figura D. 30 - Imagem metalográfica com marcações da região 4 - porção interna da chapa - aproximação de 500 vezes	126
Figura D. 31 - Imagem metalográfica da região 4 - porção interna da chapa - aproximação de 1000 vezes.....	126
Figura D. 32 - Imagem metalográfica com marcações da região 4 - porção interna da chapa - aproximação de 1000 vezes	127
Figura D. 33 - Imagem metalográfica da região 5 - porção mediana da chapa - aproximação de 25 vezes.....	127
Figura D. 34 - Imagem metalográfica da região 5 - porção mediana da chapa - aproximação de 50 vezes.....	128
Figura D. 35 - Imagem metalográfica da região 5 - porção mediana da chapa - aproximação de 100 vezes.....	128
Figura D. 36 - Imagem metalográfica da região 5 - porção mediana da chapa - aproximação de 200 vezes.....	129
Figura D. 37 - Imagem metalográfica da região 5 - porção mediana da chapa - aproximação de 500 vezes.....	129
Figura D. 38 - Imagem metalográfica com marcações da região 5 - porção mediana da chapa - aproximação de 500 vezes	130
Figura D. 39 - Imagem metalográfica da região 5 - porção mediana da chapa - aproximação de 1000 vezes.....	130
Figura D. 40 - Imagem metalográfica com marcações da região 5 - porção mediana da chapa - aproximação de 1000 vezes	131
Figura D. 41 - Imagem metalográfica da região 6 - porção externa da chapa - aproximação de 25 vezes.....	131

Figura D. 42 - Imagem metalográfica da região 6 - porção externa da chapa - aproximação de 50 vezes.....	132
Figura D. 43 - Imagem metalográfica da região 6 - porção externa da chapa - aproximação de 100 vezes.....	132
Figura D. 44 - Imagem metalográfica da região 6 - porção externa da chapa - aproximação de 200 vezes.....	133
Figura D. 45 - Imagem metalográfica da região 6 - porção externa da chapa - aproximação de 500 vezes.....	133
Figura D. 46 - Imagem metalográfica com marcações da região 6 - porção externa da chapa - aproximação de 500 vezes	134
Figura D. 47 - Imagem metalográfica da região 6 - porção externa da chapa - aproximação de 1000 vezes.....	134
Figura D. 48 - Imagem metalográfica com marcações da região 6 - porção externa da chapa - aproximação de 1000 vezes	135

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparativo entre f_y e f_{ya}	70
Gráfico 2 - Aumento da tensão de escoamento	71
Gráfico 3 - Esforço resistente de cálculo a tração: sem x com trabalho a frio	72
Gráfico 4 - Esforço resistente específico de cálculo a tração: sem x com trabalho a frio....	72
Gráfico 5 - Esforço resistente de cálculo a compressão com 0,1 metro: sem x com trabalho a frio.....	73
Gráfico 6 - Relação do esforço resistente de cálculo para compressão com 0,1m: com x sem trabalho a frio	74
Gráfico 7 - Esforço resistente específico de cálculo a compressão com 0,1 metro: sem x com trabalho a frio.....	74
Gráfico 8 - Relação do esforço resistente de cálculo para compressão com 1m: com x sem trabalho a frio.....	75
Gráfico 9 - Esforço resistente específico de cálculo a compressão com 1 metro: sem x com trabalho a frio.....	76
Gráfico 10 - Relação entre o aumento médio do esforço resistente de cálculo e o comprimento da barra.....	76
Gráfico 11 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 100 x 40	77
Gráfico 12 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 100 x 40	78
Gráfico C. 1 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 50 x 25.....	97
Gráfico C. 2 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 50 x 25.....	97
Gráfico C. 3 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 75 x 40	98
Gráfico C. 4 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 75 x 40.....	98
Gráfico C. 5 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 100 x 40	99

Gráfico C. 6 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 100 x 40.....	99
Gráfico C. 7 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 100 x 50	100
Gráfico C. 8 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 100 x 50.....	100
Gráfico C. 9 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 100 x 75	101
Gráfico C. 10 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 100 x 75.....	101
Gráfico C. 11 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 125 x 50	102
Gráfico C. 12 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 125 x 50.....	102
Gráfico C. 13 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 125 x 75	103
Gráfico C. 14 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 125 x 75.....	103
Gráfico C. 15 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 150 x 50	104
Gráfico C. 16 - C.16 – Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 150 x 50	104
Gráfico C. 17 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 150 x 75	105
Gráfico C. 18 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 150 x 75.....	105
Gráfico C. 19 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 200 x 50	106
Gráfico C. 20 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 200 x 50.....	106
Gráfico C. 21 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 200 x 75	107
Gráfico C. 22 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 200 x 75.....	107

Gráfico C. 23 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 200 x 100	108
Gráfico C. 24 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 200 x 100.....	108
Gráfico C. 25 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 250 x 100	109
Gráfico C. 26 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 250 x 100.....	109
Gráfico C. 27 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 300 x 100	110
Gráfico C. 28 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 300 x 100.....	110

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas maiúsculas

- A - Área bruta da seção transversal da barra
- A_{ef} - Área efetiva da seção transversal da barra
- B_c - Parâmetro empregado no cálculo da resistência ao escoamento da região das dobras
- C - Parâmetro empregado no cálculo da resistência ao escoamento modificada
- C_w - Constante de empenamento da seção transversal
- E - Módulo de elasticidade do aço, adotado igual a 200 GPa
- G - Módulo de elasticidade transversal, adotado igual a 77 GPa, ou o tamanho do grão segundo a ASTM.
- I_x - Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo x
- I_y - Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo y
- J - Momento de inércia à torção uniforme
- L_x - Comprimento destravado do perfil em relação ao eixo x
- L_y - Comprimento destravado do perfil em relação ao eixo y
- L_z - Comprimento destravado do perfil em relação flambagem global por torção
- $N_{c, Rd}$ - Força axial de compressão resistente de cálculo
- N_e - Força axial crítica de flambagem global elástica por flexão
- N_l - Força axial crítica de flambagem local elástica
- N_{ex} - Força axial crítica de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo x
- N_{ey} - Força axial crítica de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo y
- N_{ez} - Força axial crítica de flambagem global elástica por torção
- N_{exz} - Força axial crítica de flambagem global elástica por flexo-torção
- $N_{t, Rd}$ - Força axial de tração resistente de cálculo

Letras romanas minúsculas

- b_f - Largura nominal da mesa
- b_w - Largura nominal da alma
- f_u - Resistência à ruptura do aço na tração
- f_y - Resistência ao escoamento do aço

f_{ya} - Resistência ao escoamento do aço modificada
 f_{yc} - Resistência ao escoamento do aço na região das dobras do perfil
 f_{yf} - Resistência ao escoamento, média, para as partes planas do perfil
 k_l - Coeficiente de flambagem (local) de chapa do elemento
 k_x - Constante para cálculo do comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo x
 k_y - Constante para cálculo do comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo y
 k_z - Constante para cálculo do comprimento efetivo de flambagem global por torção
 \bar{l} - Comprimento de interceptação linear para o cálculo do tamanho do grão
 m - Parâmetro empregado no cálculo da resistência ao escoamento da região das dobras
 r_{\min} - Raio de giração mínimo da seção bruta
 r_x - Raio de giração da seção bruta do eixo x
 r_y - Raio de giração da seção bruta do eixo y
 r_i - Raio interno de dobramento
 r_0 - Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção
 t - Espessura da chapa ou do elemento
 x_0 - Distância do centro de torção ao centróide, na direção do eixo x
 y_0 - Distância do centro de torção ao centróide, na direção do eixo y

Letras gregas minúsculas

γ - Coeficiente de ponderação das ações ou das resistências, em geral
 η - Relação entre a largura da mesa (b_f) e a largura da alma (b_w)
 λ_p - Índice de esbeltez reduzido do elemento ou da seção completa
 λ_0 - Índice de esbeltez reduzido
 ν - Coeficiente de Poisson do aço, adotado igual a 0,3
 χ - Fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à instabilidade global

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
2 PERFIS FORMADOS A FRIO.....	23
2.1 Definição e características.....	24
2.2 Propriedades	26
2.3 Padronização dos perfis formados a frio.....	27
2.4 Processo de fabricação	28
2.5 Efeitos do trabalho a frio nas propriedades dos perfis	29
2.5.1 Cálculo do aumento da resistência ao escoamento devido ao efeito do trabalho a frio ..	37
3 DIMENSIONAMENTO DE PERFIS FORMADOS A FRIO.....	38
3.1 Barras tracionadas	39
3.2 Barras comprimidas	40
3.2.1 Flambagem elástica	41
3.2.1.1 Flambagem local	42
3.2.1.2 Flambagem distorcional	43
3.2.1.3 Flambagem global	44
4 ANÁLISE METALOGRAFICA	45
4.1 Estrutura micrográfica dos aços	45
4.1.1 Tamanho de grão	47
4.1.2 Ferrita	48
4.1.3 Cementita.....	49
4.1.4 Perlita.....	50
4.2 Técnica metalográfica	50
4.2.1 Preparação de amostras para microscopia ótica	51
5 METODOLOGIA.....	53
5.1 Aumento da resistência ao escoamento devido ao efeito do trabalho a frio.....	53
5.2 Cálculo dos esforços resistentes.....	55
5.2.1 Esforço axial de tração resistente de cálculo	55
5.2.2 Esforço axial de compressão resistente de cálculo.....	55
5.3 Algoritmo para o cálculo dos esforços resistentes	59
5.4 Análise metalográfica	61
5.4.1 Escolha do material e local a ser estudado	61
5.4.2 Preparação da amostra	63
5.4.3 Exame da microestrutura	67
5.4.3.1 Obtenção do tamanho do grão	68
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
6.1 Aumento da resistência ao escoamento devido ao efeito do trabalho a frio.....	70
6.2 Esforços resistentes de cálculo.....	71
6.2.1 Esforço axial de tração	71
6.2.2 Esforço axial de compressão	73
6.3 Análise metalográfica	78
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83

REFERÊNCIAS	86
ANEXO A - PERFIL U SIMPLES – DIMENSÕES, MASSAS E PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) ..	88
ANEXO B – CERTIFICADO DE QUALIDADE CHAPA DE AÇO CARBONO CST COR 400 COM DOBRA DE 90°	93
APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DE CÁLCULO DO AUMENTO DA TENSÃO DE ESCOAMENTO DEVIDO AO EFEITO DO TRABALHO A FRIO PARA TRAÇÃO E COMPRESSÃO.....	94
APÊNDICE B – FLUXOGRAMA DE CÁLCULO DO ESFORÇO RESISTENTE DE CÁLCULO DE PERFIS U SIMPLES SUBMETIDOS A COMPRESSÃO CENTRADA	95
APÊNDICE C – GRÁFICOS DOS ESFORÇOS RESISTENTES DE CÁLCULOS DE PERFIS U SIMPLES SUBMETIDOS A COMPRESSÃO, SEM E COM EFEITO DO TRABALHO A FRIO	96
APÊNDICE D – IMAGENS DO ENSAIO DE METALOGRAFIA DE CHAPA DE AÇO CARBONO CST COR 400 COM DOBRA DE 90°	111

1 INTRODUÇÃO

Produtos originados do ferro são utilizados pelo homem desde, pelo menos, 1200 a.C. A produção de ferro e suas ligas – caracterizam-se como misturas de dois ou mais elementos com, pelo menos, um elemento metálico, resultando em um produto com características metálicas - durante muitos séculos, era feita de forma artesanal, envolvendo diversos tipos de processos associados a trabalho mecânico além de controle das condições de aquecimento e resfriamento. Os aços são as ligas a base de ferro mais amplamente aplicadas e ocupam lugar de destaque entre os materiais industriais há, pelo menos, dois séculos (COLPAERT, 2008).

Alguns fatores contribuem para a importância do aço dentre os materiais industriais: abundância do ferro na crosta terrestre, o custo relativamente baixo de produção, as notáveis combinações de propriedades físicas e mecânicas capazes de serem atingidas com o aço, a facilidade de serem reciclados, pela vida relativamente curta quando descartados e pelo consumo específico de energia relativamente baixo em sua produção (COLPAERT, 2008).

A possibilidade de se obter desempenho ótimo do aço juntamente com as combinações de propriedades físicas e mecânicas estão intimamente ligados à capacidade de manipulação de suas características através do processamento e fabricação, de modo a obter as combinações de características mais favoráveis para determinada aplicação. (COLPAERT, 2008)

Os aços são amplamente utilizados em perfis estruturais para construção de edifícios, máquinas, equipamentos, indústria automotiva e aeronáutica. As estruturas de aço são de extrema importância no âmbito da engenharia mecânica moderna porque, através do desenvolvimento de novas tecnologias, permitem a otimização dos processos quando esses elementos são utilizados na indústria. No Brasil, a utilização das estruturas de aço é algo recente e representa a aposta do mercado nacional onde várias construtoras estão investindo no emprego do aço devido a sua versatilidade e diversas vantagens que são percebidas na execução da obra (CORTEZ, 2017).

Os perfis formados a frio representam uma parcela significativa de utilização na construção. Diante desse cenário, é importante estudar e entender o comportamento desses perfis estruturais de aço. Esse estudo se dá por meio da verificação de sua performance em determinadas situações e solicitações de trabalho, isto é, através de sua resistência mecânica.

O presente trabalho se justifica no contexto apresentado, no qual há a valorização das estruturas de aço em virtude das estruturas de concreto. Tal panorama é motivador para analisar o comportamento das estruturas de aço no intuito de oferecer dados e embasamento teórico para otimizar o dimensionamento desses elementos e facilitar o trabalho dos engenheiros calculistas.

Os perfis de aço do tipo U formados a frio representam uma parcela significativa de utilização em estruturas de aço de pequeno porte, tais como coberturas e treliças em geral, porém não dispõe de referencial bibliográfico o suficiente para permitir um entendimento claro, através de fundamentos teóricos, normativos e práticos, do comportamento desses perfis quando se considera os efeitos da conformação a frio em perfis estruturais de aço.

Dessa forma, o objeto de estudo trata-se em apresentar o resultado da análise do efeito do trabalho a frio no comportamento de perfis estruturais formados a frio com chapas finas de aço-carbono com tensão de escoamento igual a 250MPa. Tal estudo será realizado através da obtenção do esforço resistente de cálculo desses perfis submetidos aos esforços de tração e compressão, sem considerar o efeito do trabalho como também levando em conta esse efeito. Serão considerados fatores normativos da NBR6355:2012 e NBR14762 para os perfis formados a frio, estudos das referências bibliográficas e análise metalográfica.

A hipótese inicial se baseia na influência positiva processo de fabricação na resistência dos perfis estruturais de aço formados a frio. Além disso, o tipo de esforço de solicitação – sendo ele de tração ou compressão – também pode influenciar no comportamento e, no grau de influência da conformação a frio na resistência dos perfis de aço.

Para esse intuito, será necessário, primeiramente, o levantamento e estudo teórico da bibliografia a respeito de perfis formados a frio para compreender melhor o que outros autores já abordaram, pesquisaram e relataram sobre o tema. Posteriormente, as normas NBR6355:2012 e NBR14762:2010 serão estudadas e analisadas para permitir o embasamento normativo e realizar o cálculo das resistências dos perfis U formados a frio quando submetidos aos esforços de tração e compressão.

Com isso, serão calculados os esforços resistentes de cálculo para cada série dos perfis dos perfis formados a frio de acordo com a NBR14762. Para isso, um fluxograma da sequência de cálculo será elaborado considerando os requisitos das normas citadas. Além disso, será elaborado um algoritmo que permita efetuar automaticamente o cálculo da resistência dos perfis para otimizar e facilitar o processo de análise. Os dados obtidos serão tabulados para permitir melhor visualização e elaboração de gráficos comparativos de resistência e resistência específica de cálculo dos perfis.

Em seguida, será avaliada a influência das tensões residuais e conformação mecânica a frio através de considerações normativas e pesquisas, para assim, calcular os esforços resistentes de cálculo considerando o efeito do trabalho a frio. Com isso, serão apresentados os gráficos de tendência do comportamento dos perfis quando submetidos aos esforços de tração e compressão, como também os gráficos do esforço resistente específico de cálculo para as

mesmas solicitações. Assim, serão obtidas as equações de tendência da resistência mecânica dos perfis.

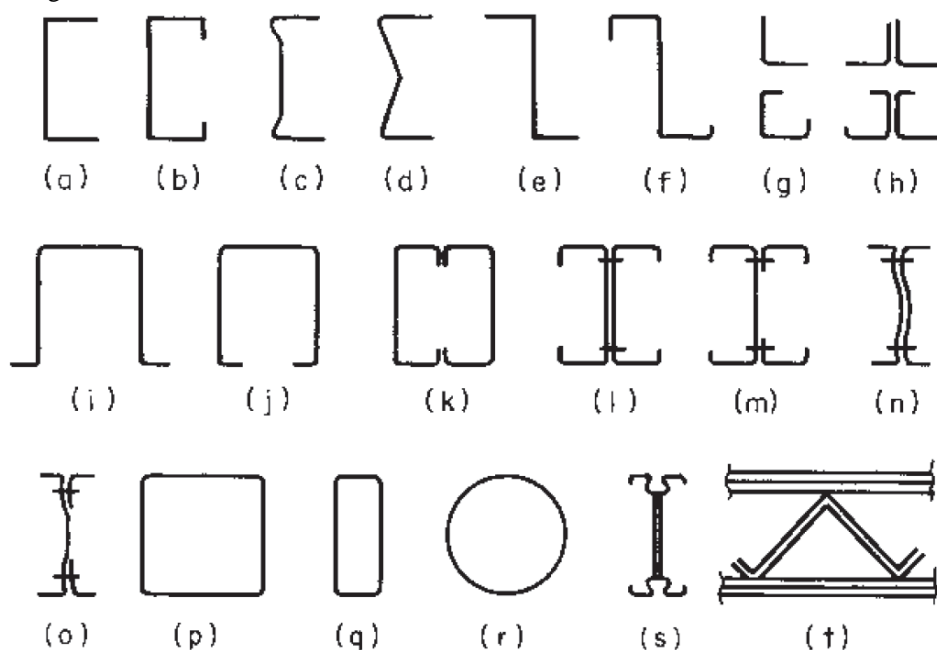
No intuito de fortalecer a análise, serão executados ensaios metalográficos em uma amostra de perfil U de 150x40x4,75 com chapa de aço carbono CST COR 400, para entender algumas mudanças básicas que o trabalho a frio promove na estrutura micrográfica dos perfis e, assim, apresentar o nível de influência do trabalho a frio para cada tipo de serie dos perfis U simples e para cada tipo de esforço.

2 PERFIS FORMADOS A FRIO

No ramo da construção de aço, existem duas principais famílias de elementos estruturais (YU e LABOUBE, 2010). A primeira delas, é a conhecida como grupo dos perfis laminados a quente. O outro grupo, é menos conhecido, porém de grande importância, é composto de perfis formados a frio através a conformação de chapas de aço que, de acordo com Yu e Laboube (2010) e reforçado por Baptista (2014), é um processo de obtenção de perfis metálicos bastante eficiente, possibilitando a obtenção de perfis mais leves e mais esbeltos, com menor espessura.

Existem diversas configurações e características dos perfis formados a frio, a Figura 01 apresenta exemplos de perfis estruturais formados a frio, tais como perfis U simples (a) e enrijecidos (b), seção Z (e), cantoneiras (g) e perfis tubulares (p), (q) e (r).

Figura 1 - Perfis estruturais formados a frio



Fonte: YU, W; LABOUBE, R., 2010, p.2

Ainda de acordo com Yu e Laboube (2010) e destacado também por Baptista (2014), a utilização de perfis formados a frio no ramo da construção começou por volta de 1850, tanto nos Estados Unidos, quanto na Inglaterra. Os autores destacam que esse tipo de perfil não foi largamente utilizado nas construções até por volta de 1946 onde a AISI (American Iron and Steel Institute) promoveu e desenvolveu um conjunto de especificações e características sobre o dimensionamento de estruturas de aço compostas por perfis formados a frio através de pesquisas em parceria com a Cornell University sob coordenação de George Winter.

Antes de apresentar os detalhes dos estudos desenvolvidos em relação aos perfis formados a frio, é necessário compreender a definição e as principais características desses perfis.

2.1 Definição e características

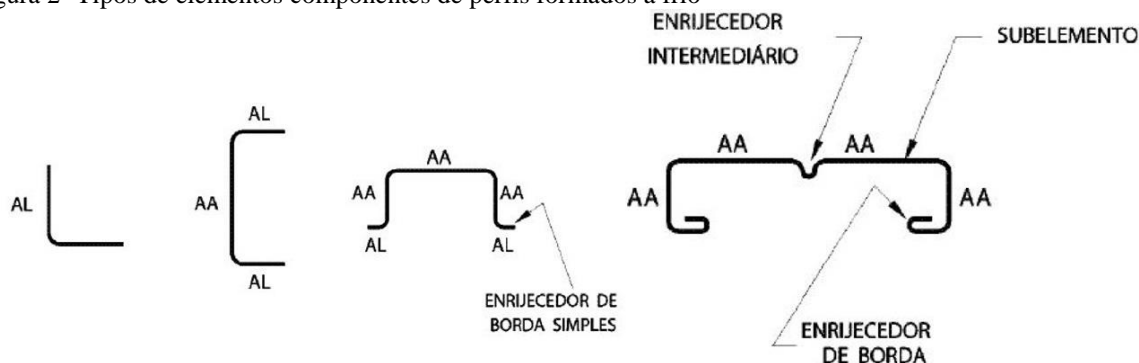
Sobre a definição desse tipo de seção, para a NBR6355:2012 – norma que estabelece os requisitos exigíveis dos perfis estruturais de aço formados a frio com seção transversal aberta, tais como tolerâncias dimensionais, aspectos superficiais, acondicionamento e inspeção – perfil estrutural de aço formado a frio é o:

Perfil obtido por dobramento, em prensa dobradeira, de tiras cortadas de chapas ou bobinas, ou por conformação contínua em conjunto de matrizes rotativas, a partir de bobinas laminadas a frio ou a quente, revestidas ou não, sendo ambas as operações realizadas com o aço em temperatura ambiente (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012, p.1).

De acordo com as definições da NBR14762:2010 – norma que estabelece os requisitos básicos que devem ser obedecidos no dimensionamento de perfis estruturais de aço formados a frio – os perfis de aço formados a frio são constituídos por três elementos: elemento com bordas vinculadas (AA), elemento com borda livre (AL) e, enrijecedores, que podem ser de borda simples ou enrijecedor intermediário. Os elementos AA, segundo a NBR14762 (2010, p.3), consistem em um “elemento plano com as duas bordas vinculadas a outros elementos na direção longitudinal do perfil”.

Já os elementos AL, ainda de acordo com a NBR14762 (2010, p.4), trata-se do “elemento plano vinculado a outro elemento em apenas uma borda na direção longitudinal do perfil”. Os enrijecedores de bordas simples são constituídos “por um único elemento plano” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, p.4). Nos enrijecedores intermediários as duas bordas estão conectadas, cada uma por dois subelementos do perfil, como mostrado na Figura 2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010).

Figura 2 -Tipos de elementos componentes de perfis formados a frio



Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p.4

Silva, Pierin e Silva (2014) dizem que os perfis de aço formados a frio são cada vez mais utilizados na construção civil, devido a rapidez e economia exigidas pelo mercado, podendo ser eficientemente utilizados em galpões de pequeno e médio porte, coberturas, mezaninos, em casas populares e edifícios de pequeno porte.

Os autores também destacam que a característica de maleabilidade das chapas de aço permite a fabricação de grande variedade de seções transversais para perfis formados a frio. Desde os perfis mais simples como a cantoneira – seção em forma de L – mais indicado para trabalhar sob condições de tração, até os perfis formados a frio duplos, conhecidos como seção-caixão, que devido à boa rigidez à torção, menor área exposta – que influencia na área de pintura – e menos regiões para estagnação de líquidos ou detritos – diminuindo a probabilidade de corrosão – são os principais motivos para escolha desse tipo de perfil (SILVA, PIERIN e SILVA, 2014).

Além disso, estruturas pré-fabricadas com perfis formados a frio possuem um tempo reduzido de execução por serem compostas por chapas finas, possuem menor peso, o que facilita a fabricação, manuseio, transporte e diminui o custo de montagem por não necessitar de maquinários pesados para fazer o içamento (SILVA, PIERIN e SILVA, 2014).

Yu e Laboube (2010) destacam outras duas vantagens dos perfis formados a frio: comparado com perfis espessos laminados a quente, os perfis formados a frio podem ser fabricados com cargas relativamente baixas e; perfis com seções complexas podem ser produzidos através de processos de conformação a frio e conseqüentemente a obtenção de relações favoráveis entre resistência-peso do perfil.

2.2 Propriedades

A NBR14762:2010 e NBR6355:2002 estabelecem as características e propriedades dos materiais para os perfis formados a frio. Segundo essas normas, os aços com qualificação estrutural devem possuir propriedades mecânicas adequadas para receber o trabalho a frio, através da relação entre a resistência à ruptura e a resistência ao escoamento (f_u/f_y) maior ou igual a 1,08, e o alongamento após ruptura não deve ser menor que 10% para base de medida igual a 50 mm ou 7% para base de medida igual a 200 mm (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010).

Ainda de acordo com as normas citadas, a utilização de aços sem qualificação estrutural para perfis formados a frio é tolerada se o aço possuir propriedades mecânicas adequadas para receber o trabalho a frio. Para aumentar a segurança no dimensionamento desses elementos, não devem ser adotados no projeto valores superiores a 180 MPa e 300 MPa para a resistência ao escoamento (f_y) e a resistência à ruptura (f_u), respectivamente (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010). A Figura 3 mostra as principais propriedades mecânicas prescritas na NBR14762:2010.

Figura 3 - Chapas finas de aço especificadas por normas brasileiras para uso estrutural

Especificação	Grau	f_y (MPa)	f_u (MPa)
ABNT NBR 6649 / ABNT NBR 6650 Chapas finas (a frio/a quente) de aço-carbono	CF-26	260/260	400/410
	CF-28	280/280	440/440
	CF-30	---/300	---/490
ABNT NBR 5004 Chapas finas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica	F-32/Q-32	310	410
	F-35/Q-35	340	450
	Q-40	380	480
	Q-42	410	520
	Q-45	450	550
ABNT NBR 5920 / ABNT NBR 5921 Chapas finas e bobinas finas (a frio/a quente), de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica	CFR 400	---/250	---/380
	CFR 500	310/370	450/490
ABNT NBR 7008 / ABNT NBR 7013 / ABNT NBR 14964 Chapas finas e bobinas finas com revestimento metálico ^b	ZAR 250	250	360
	ZAR 280	280	380
	ZAR 320	320	390
	ZAR 345	345	430
	ZAR 400	400	450
^a A faixa de espessura disponível varia de acordo com o produtor de aço.			
^b Graus conforme ABNT NBR 7008.			

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p.12.

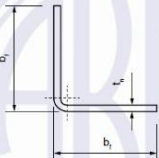
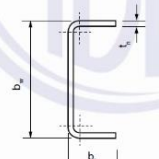
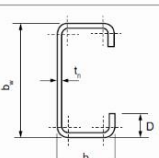
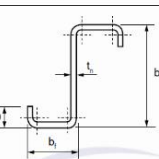
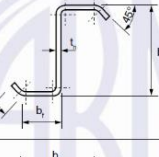
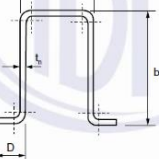
As propriedades mecânicas gerais estabelecidas pela NBR14764:2010 para os perfis formados a frio são: módulo de elasticidade (E) igual a 200 GPa; coeficiente de Poisson (ν)

igual a 0,3; módulo de elasticidade transversal (G) igual a 77 GPa; tensão residual (σ_r) igual a 75 MPa; coeficiente de dilatação térmica igual a $1,2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e; massa específica (ρ) igual a 7850 kg/m^3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010).

2.3 Padronização dos perfis formados a frio

Os perfis estruturais de aço formados a frio possuem as séries comerciais mais utilizadas e as respectivas designações definidas pela NBR6355:2012 e estão representadas na Figura 4. Além disso, as tabelas com as características e propriedades geométricas dos perfis tipo U simples podem ser verificadas no Anexo A.

Figura 4 - Séries comerciais mais usuais de perfis estruturais e respectivas designações

Série	Seção transversal	Designação ^a
Cantoneira de abas iguais		L $b_f \times t_f$ Exemplo: L 50 x 3,00
U simples		U $b_w \times b_f \times t_f$ Exemplo: U 150 x 50 x 2,65
U enrijecido		Ue $b_w \times b_f \times D \times t_f$ Exemplo: Ue 150 x 60 x 20 x 2,65
Z enrijecido a 90°		Z ₉₀ $b_w \times b_f \times D \times t_f$ Exemplo: Z ₉₀ 200 x 75 x 20 x 2,25
Z enrijecido a 45°		Z ₄₅ $b_w \times b_f \times D \times t_f$ Exemplo: Z ₄₅ 200 x 75 x 20 x 2,25
Cartola		Cr $b_w \times b_f \times D \times t_f$ Exemplo: Cr 100 x 50 x 20 x 3,35

^a As dimensões devem ser apresentadas em milímetros.

Fonte: ADAPTADO, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012, p.4 e p.5

2.4 Processo de fabricação

Souza (1982) caracteriza o trabalho a frio como a deformação mecânica aplicada em um material em uma temperatura abaixo da temperatura de recristalização do material. Colpaert (2008) indica que essa temperatura se situa na zona crítica do material, que também pode ser caracterizada como a temperatura de recozimento, em torno de 727°C , e varia de acordo com a quantidade de carbono do aço e do tipo de liga.

Dessa forma, Silva, Pierin e Silva (2014) dizem que existem dois processos de fabricação dos perfis formados a frio: o processo contínuo e o descontínuo. Já Yu e Laboube (2010) caracterizam o primeiro como laminação a frio e o segundo processo como dobramento por prensa. O processo contínuo, adequado à fabricação em série, é realizado a partir do deslocamento longitudinal de uma chapa de aço, sobre os roletes de uma linha de perfilação que vão conferindo gradativamente à chapa, a forma definitiva do perfil e, quando o perfil deixa a linha de perfilação, ele é cortado no comprimento indicado no projeto.

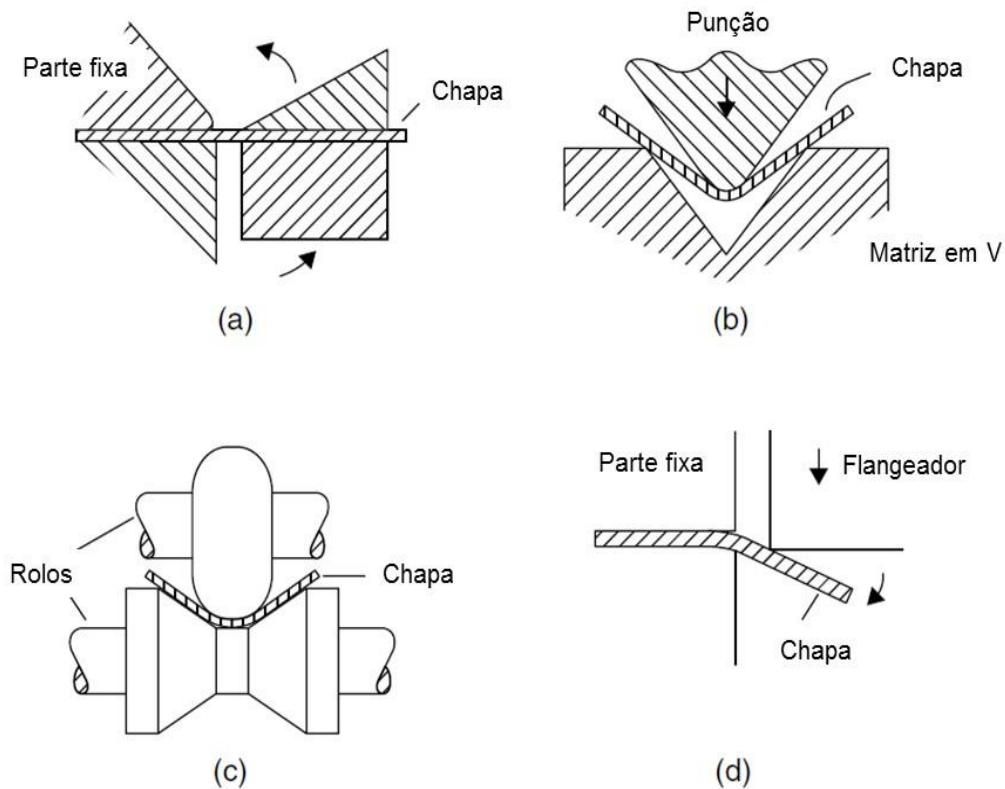
Segundo Yu e Laboube (2010), a máquina usada na conformação a frio consiste de pares de rolos que progressivamente formam tiras na forma final desejada. O autor ainda diz que uma seção simples pode ser produzida por apenas seis pares de rolos, porém, uma seção complexa pode exigir até 15 conjuntos de rolos.

Já o processo descontínuo é adequado a pequenas quantidades de perfis é realizado mediante o emprego de uma prensa dobradeira que deforma a chapa de aço, obrigando-a a formar uma dobra. Operações sucessivas de dobramento sobre a mesma chapa, fornecem à seção do perfil a geometria exigida no projeto (SILVA, PIERIN e SILVA, 2014).

Segundo Marciniak, Duncan e Hu (2002), existem várias formas para conformar uma chapa ao longo de uma linha reta. A Figura 5 mostra os principais processos de dobramento destacados pelo autor. Na dobra (a), a peça é mantida estacionária no lado esquerdo e a borda é presa entre as ferramentas móveis que giram. No caso de uma prensa dobradeira (b), a peça fica estática sobre uma matriz, enquanto a matriz superior aplica uma força sobre a chapa, que se deforma sobre a matriz inferior formando a dobra. As dobras podem ser formadas continuamente em tiras longas por meio de laminação (c).

Uma técnica de flexão na borda de uma peça é a estampagem ou flangeamento conforme mostrado na Figura 5 (d). A peça é presa no lado esquerdo e a ferramenta de flange se move para baixo para formar a dobra.

Figura 5 - Tipos de processos de dobramento e conformação a frio



Fonte: ADAPTADO, MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J.; HU, S, 2002, p. xiv.

Ainda segundo Marciniak, Duncan e Hu (2002), no processo de dobramento a deformação plástica ocorre apenas na região da dobra e o material longe da dobra não é deformado. O autor ainda diz que se o material não tiver ductilidade, trincas podem aparecer na superfície externa da dobra, mas a maior dificuldade é geralmente obter um ângulo de dobra preciso porque, depois que a carga é retirada da chapa metálica ela tende a retornar a sua posição original, então o ângulo de dobra diminui, fenômeno chamado de retorno elástico.

Este fenômeno foi estudado por Pires (2014) e representa um dos efeitos do trabalho a frio dos metais. O autor diz que um dos grandes problemas dos processos de conformação de chapas é o retorno elástico, que consiste na diferença entre a chapa na fase final e na nominal, ou seja, entre resultado final da conformação e a situação da peça no momento antes da remoção das ferramentas.

2.5 Efeitos do trabalho a frio nas propriedades dos perfis

Silva, Pierin e Silva (2014), assim como Yu e Laboube (2010), Smallman e Bishop (1999), Sloof e Schuster (2000) dizem que as propriedades de um material são alteradas pelo trabalho a frio, ou seja, deformação a uma temperatura baixa em relação ao seu ponto de fusão,

mas nem todas as propriedades são melhoradas. Yu e Laboube (2010) destacam que as propriedades mecânicas dos perfis de aço formados a frio são substancialmente diferentes daquelas da chapa de aço, placa ou barra antes de serem conformadas. Os quatro autores dizem que a operação de conformação a frio aumenta a tensão de escoamento e a resistência à tração. Entretanto, o aumento percentual na resistência à tração é menor do que o aumento na tensão de escoamento (YU e LABOUBE, 2010).

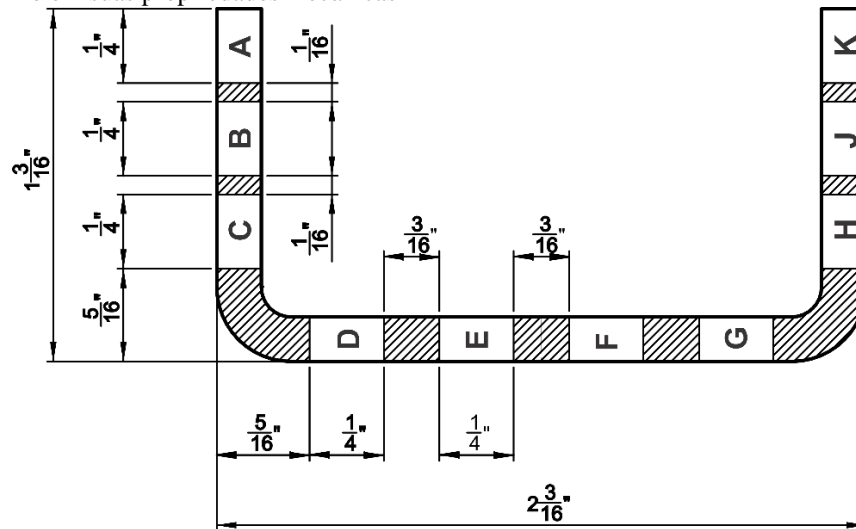
Os autores mencionados também dizem que a plasticidade e capacidade geral para deformar – denominada como ductilidade – diminuem. Souza (1982) destaca que durante a deformação a frio ocorre a “perda de energia de deformação dissipada na forma de calor produzido por fricção interna. Segundo ele, “essa perda de energia é chamada de histerese mecânica” (Souza, 1982, p.33). E por esse motivo “a chapa deve ser conformada com raio de dobramento adequado ao material e a sua espessura, a fim de se evitar o aparecimento de fissuras” (SILVA, PIERIN e SILVA, 2014, p.19).

Smallman e Bishop (1999) incluem que as propriedades físicas, como condutividade elétrica, densidade e outras, também são reduzidas. Silva, Pierin e Silva (2014) acrescentam que o dobramento de uma chapa provoca uma estrição na região da dobra, porém, a variação nas dimensões da seção decorrente dessa estrição pode ser desconsiderada para efeito de dimensionamento.

Dentre as alterações nas propriedades destacadas, as que têm maior destaque são as que ocorrem nas propriedades mecânicas, como a tensão de escoamento do aço. Para entender melhor essas alterações, Karren e Winter (1965) iniciaram os primeiros estudos sobre o comportamento mecânico de perfis estruturais formados a frio, através de extensivas pesquisas experimentais financiadas pela AISI, como mencionando na seção 2 deste trabalho. Segundo ao autor, o trabalho a frio pode proporcionar significativo aumento na resistência ao escoamento na tração e na compressão. Os valores podem atingir até 70% de aumento em relação à tensão de escoamento do material virgem.

Os estudos do autor e respaldados por Yu e Laboube (2010), levaram em consideração as características das regiões que sofrem a conformação a frio, regiões adjacentes às dobras e regiões que sofrem pouca ou nenhuma influência do processo de conformação, como apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Regiões analisadas nos perfis U simples em relação ao efeito do trabalho a frio em suas propriedades mecânicas



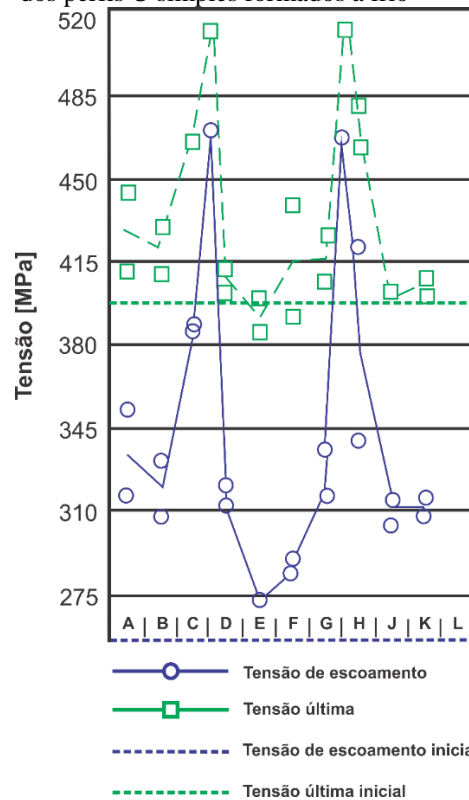
Fonte: ADAPTADO, YU, W; LABOUBE, R., 2010, p.38

Yu e Laboube (2010), assim como mencionado por Marciniak, Duncan e Hu (2002) no tópico anterior, dizem que como o material na região das dobras de uma seção é submetido a uma conformação a frio em um grau consideravelmente mais alto do que o material nos elementos planos, as propriedades mecânicas são diferentes em várias partes da seção transversal. Por esse motivo, Yu e Laboube (2010) afirmam que flambagem ou a deformação sempre começa na parte plana devido à menor tensão de escoamento, onde qualquer carga adicional aplicada à seção se espalhará para os cantos.

Silva, Pierin e Silva (2014) acrescentam que quando o processo de formação dos perfis é descontínuo, isto é, através de prensas dobradeiras, o aumento das resistências à tração e ao escoamento se concentra na região das dobras, uma vez que apenas as regiões das curvas estão sob carregamento. Já no processo contínuo, laminação a frio com rolos, esse acréscimo atinge outras regiões do perfil, porque toda parte do perfil entre os roletes está sob tensão na linha de perfilação.

Para comprovar o comportamento descrito pelos autores acima, Karren e Winter (1965) explicam o método de teste para verificar a resistência do perfil nas regiões identificadas na Figura 6, no qual as amostras são cortadas seguindo o conceito da imagem acima e submetidas aos testes de tração e compressão em todos os seguimentos cortados para determinar as tensões de escoamento, tensão última (resistência à tração) e tensão de ruptura do material. Yu e Laboube (2010) que tomam como referência Karren e Winter (1965) mostram os resultados dos testes e são apresentados na Figura 7, que ilustra as variações das propriedades mecânicas em regiões específicas de uma seção tipo U.

Figura 7 - Efeito do trabalho a frio nas propriedades mecânicas em diferentes regiões dos perfis U simples formados a frio



Fonte: ADAPTADO, YU, W; LABOUBE, R., 2010, p.38

Esse comportamento é explicado por Yu e Laboube (2010) e Britvec, Chajes, Karren, Uribe e Winter (1970) no qual indicam que as mudanças nas propriedades mecânicas devido ao trabalho a frio são causadas principalmente pelo encruamento e pelo envelhecimento. Souza (1982) caracteriza o encruamento como a característica de endurecimento do material devido a deformação a frio na zona plástica. Segundo Gere e Goodno (2012), durante o encruamento, o material sofre alterações em sua estrutura cristalina, resultando em maior resistência do material após a deformação.

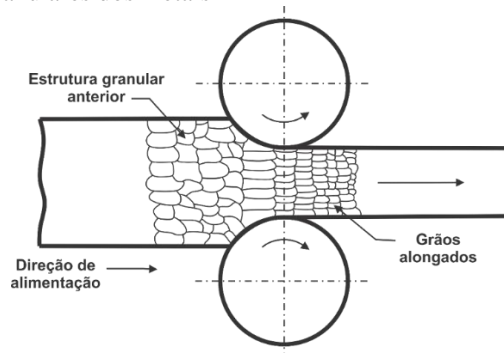
Da mesma forma, Lu (1990) diz que o encruamento é o termo usado para o aumento da resistência através do aumento da deformação plástica ou o fluxo que acontece após o ponto de escoamento, ou seja, quando uma amostra de aço é submetida a um carregamento que passa do regime elástico para o plástico, onde a carga é retirada e imediatamente aplicada na peça na mesma direção, a tensão de escoamento do aço virgem é aumentada para o respectivo ponto onde a carga foi retirada da amostra. O autor ainda acrescenta que o encruamento é uma propriedade permanente somente em temperaturas menores que cerca de 35% da temperatura de fusão do material.

De acordo com Souza (1982) quando um aço é submetido a um ensaio de tração passando do regime elástico para o plástico e depois descarregado e reensaiado logo após a liberação da carga, o escoamento ocorrido no primeiro ensaio não acontecerá “porque as discordâncias já se libertam da atmosfera de átomos intersticiais de carbono e nitrogênio” (Souza, 1982, p.33). Entretanto, o autor destaca que a zona plástica se apresentará se o material for submetido a uma tensão mais alta do que no primeiro carregamento. Dessa forma, novos procedimentos semelhantes ao descrito anteriormente, elevarão ainda mais a tensão que provoca o início do escoamento e plasticidade.

Especificamente, a Figura 8 apresenta detalhes desse fenômeno e complementa a explicação do autor sobre o encruamento:

O encruamento de um modo geral é explicado pelas interações das discordâncias com outras discordâncias ou com outras barreiras que impedem sua livre movimentação. Um metal recozido sem sofrer deformação plástica possui de 10^6 a 10^8 discordâncias por centímetro quadrado, enquanto um metal severamente deformado plasticamente contém cerca de 10^{12} discordâncias pela mesma unidade de área. Assim, a interferência de discordâncias ocorre muito mais frequentemente devido ao maior número de sistemas de escorregamento operando e é necessário oferecer maior energia para que as discordâncias vençam as barreiras citadas e possam se movimentar. Os contornos de grão são exemplos específicos de barreiras à movimentação das discordâncias, que são empilhadas nesses contornos (SOUZA, 1982, p. 34).

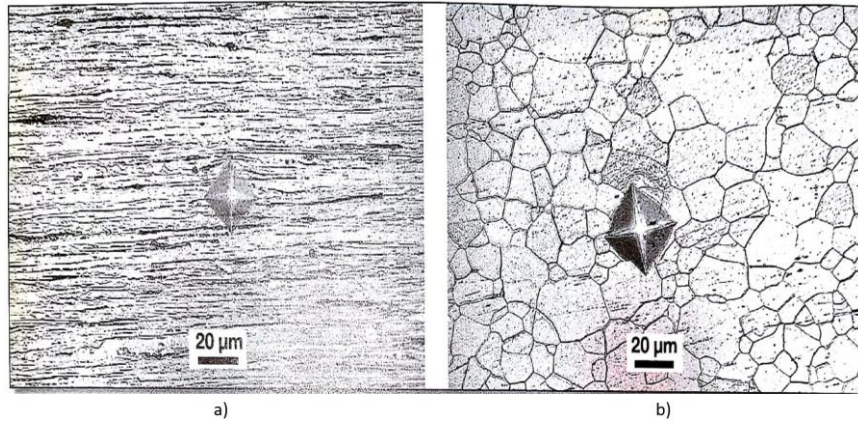
Figura 8 - Efeito do trabalho a frio nas características granulares dos metais



Fonte: ADAPTADO, CHICAGO METAL ROLLED PRODUCTS, 2018.

Adicionalmente, Colpaert (2008) traz informações sobre as características microestruturais dos aços quando deformados a frio. Segundo o autor, as propriedades mecânicas e, conseqüentemente, as aplicações do material, são refletidos pelas diferenças marcantes de microestrutura de um aço deformado a frio em comparação com um aço recozido ou em sua característica inicial. A Figura 9 ilustra as diferenças citadas pelo autor, onde, trata-se de um aço AISI 1006 trefilado (a) e o mesmo aço no estado recozido (b).

Figura 9 - Efeitos do trabalho a frio nas características microestruturais



Fonte: COLPAERT, 2008, p.402

Segundo o Total Materia (2018), o fenômeno do envelhecimento foi observado pela primeira vez no século XIX, quando a capacidade máxima de resistência de uma peça obteve um aumento após ter sido testada novamente após uma série anterior de testes na zona plástica do metal. De acordo com o site, a base física deste fenômeno pode ser interpretada pela difusão, dependente do tempo, de pequenos elementos, como carbono e nitrogênio, em falhas cristalinas (por exemplo, deslocamentos).

O site informa ainda que nos últimos 50 anos, uma vasta gama de pesquisas mostrou que todos os aços estruturais são potencialmente suscetíveis ao envelhecimento. O envelhecimento por deformação é conhecido por causar um aumento na tensão de escoamento e resistência à tração final em barras de aço, enquanto a capacidade de alongamento à tração será menor nas barras de aço envelhecidas.

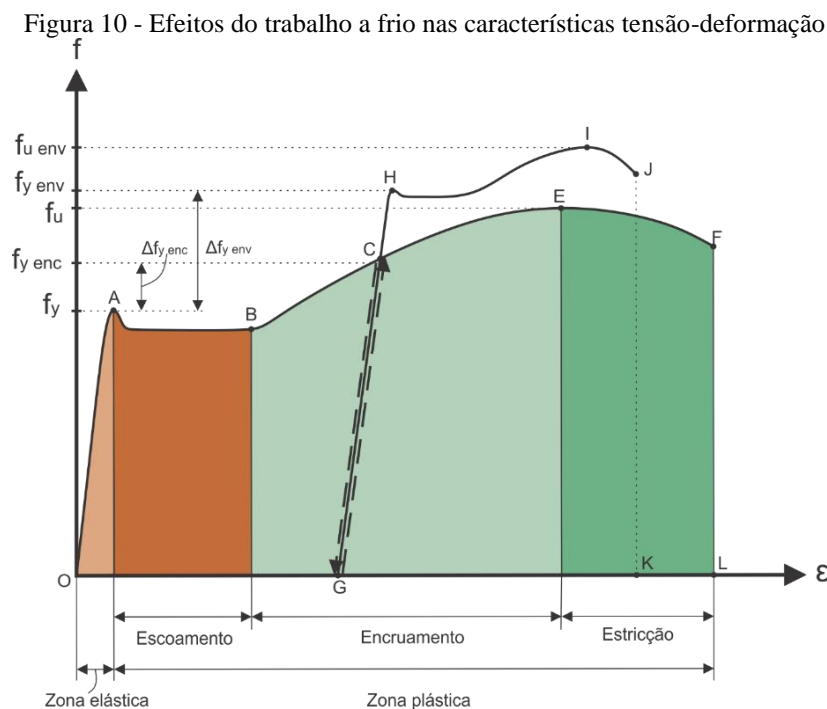
Para exemplificar, Yu e Laboube (2010), Sloof e Schuster (2000) e Souza (1982) caracterizam a curva tensão-deformação de um aço quando submetido ao trabalho a frio, mostrada na Figura 10. Segundo os autores, a curva OABCEF representa a curva tensão-deformação de um aço virgem. O ponto A representa o final da zona elástica do material e início do escoamento. Entre o ponto A e B ocorre o escoamento do material e, a partir do ponto B até o ponto C ocorre o encruamento, já explicado anteriormente.

De acordo com Souza (1982), quando um material virgem é submetido a um carregamento começando do ponto O, passando da zona elástica para a zona plástica até o ponto C, caracteriza-se que o material sofre uma deformação plástica permanente, como por exemplo um dobramento. Se o carregamento for retirado e logo em seguida recarregado sobre a amostra, passando do ponto C para o G, a curva tensão-deformação do aço passa a ser curva definida por GCEFO no qual a curva a partir do ponto C retoma a mesma posição, não apresentando uma região de escoamento nítida e como se o recarregamento não tivesse acontecido (SOUZA,

1982). Dessa forma, o autor destaca que o limite de resistência (ponto E) é muito pouco afetado por qualquer descarregamento durante o ensaio. Porém, depois que o material foi deformado permanentemente, o comportamento do material se altera, havendo um aumento na tensão de escoamento, saindo de f_y para $f_{y\text{ enc}}$, e diminuição da ductilidade que, previamente era OL e passa a ser GL (YU e LABOUBE, 2010).

Observando a Figura 10, a curva GHIJ representa o comportamento do material quando sofre o envelhecimento que, “à temperatura ambiente necessita vários dias de permanência para ocorrer, mas a uma temperatura mais alta (como por exemplo 150 °C para esses aços) pode se dar em algumas horas” (SOUZA, 1982, p. 35). Segundo o mesmo autor, “a volta do escoamento significa que os átomos intersticiais se difundem novamente para as discordâncias durante o período de envelhecimento” (SOUZA, 1982, p. 35). O autor diz ainda que aumento da resistência da liga será maior quanto maior for o tempo de envelhecimento. Porém, “tempos muito longos acarretam um super-envelhecimento que diminui a resistência da liga” (SOUZA, 1982, p. 35).

Como no processo de encruamento, o envelhecimento promove aumento na tensão de escoamento que anteriormente era f_y e passa a ser $f_{y\text{ env}}$ (YU e LABOUBE, 2010). Além disso, o autor mostra que a tensão última do material sofre aumento, saindo de f_u para $f_{u\text{ env}}$. Entretanto, como no encruamento, a ductilidade diminui e, nesse caso, em grau maior saindo de OL para OK.

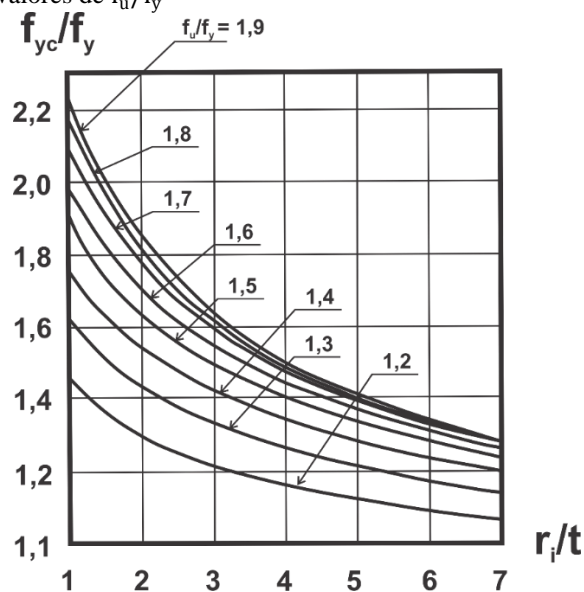


Fonte: ADAPTADO, YU, W; LABOUBE, R., 2010, p.39

De acordo com Yu e Laboube (2010), os efeitos do trabalho a frio nas propriedades mecânicas na região das dobras geralmente dependem de seis características: do tipo de aço; do tipo de tensão (compressão ou tração); da direção da tensão em relação à direção do trabalho a frio (transversal ou longitudinal); da relação f_u/f_y e; da relação entre raio interno de dobra e espessura (r_i/t) e; da quantidade de trabalho a frio. Em geral, o aumento da tensão de escoamento é mais pronunciado para as chapas de aço laminadas a quente do que para as chapas com redução a frio.

Entre os itens acima, as relações f_u/f_y e r_i/t são os fatores mais importantes que afetam a mudança nas propriedades mecânicas das seções formadas (YU e LABOUBE, 2010). Segundo o autor, o material virgem com uma grande relação f_u/f_y possui um grande potencial para encruamento. Conseqüentemente, à medida em que essa relação aumenta, o efeito do trabalho a frio no aumento da tensão de escoamento do aço também aumenta. Pequenas relações entre o raio interno de dobra e espessura (r_i/t) correspondem a um grande grau de trabalho a frio em uma dobra e, portanto, para um dado material, quanto menor essa relação maior o aumento na tensão de escoamento (YU e LABOUBE, 2010). A Figura 11 abaixo representa a relação entre os fatores destacados acima, onde f_{yc} representa a tensão de escoamento aumentada na região das dobras e a relação f_{yc}/f_y representa o aumento da tensão de escoamento na região das dobras em relação a tensão de escoamento do material virgem.

Figura 11 - Relação entre f_{yc}/f_y e r_i/t baseados em valores de f_u/f_y



Fonte: ADAPTADO, YU, W; LABOUBE, R., 2010, p.39

2.5.1 Cálculo do aumento da resistência ao escoamento devido ao efeito do trabalho a frio

Os estudos de Yu e Laboube (2010) que fazem referência Sloof e Schuster (2000), Britvec, Chajes, Karren, Uribe e Winter (1970) e Karren e Winter (1965) determinam as equações para a aproximação da tensão de escoamento de uma seção completa, levando em conta o seu aumento nas regiões das dobras e a permanência de seus valores nas regiões que não são submetidas ao trabalho a frio. Dessa forma, os autores apresentam as equações para o cálculo do aumento da tensão de escoamento da seção completa que são base das equações informadas pela NBR14762:2010 e serão apresentados na seção 5.1.

A Seção A3.3.2 da S-100-16 (Especificação Norte-Americana para dimensionamento de perfis estruturais formados a frio) permite a utilização do aumento das propriedades do material resultante de uma operação de conformação a frio. A NBR14762:2010 também toma como referência as mesmas equações para o cálculo do aumento da resistência ao escoamento devido ao efeito do trabalho a frio, abordadas no Anexo B da norma.

A norma brasileira permite essa modificação na tensão de escoamento do material quando os perfis são submetidos aos esforços de tração, compressão centrada, flexão simples e composta e barras com painel conectado à mesa tracionada. Já a norma norte-americana possibilita a alteração para elementos submetidos à tração, compressão centrada, flexão simples e composta e elementos submetidos a cargas combinadas, como esforços axiais e de flexão.

Algumas restrições são impostas pelas normas citadas e se baseiam nas características geométricas dos perfis e propriedades mecânicas do material. Isto é, a Equação (5) somente é aplicável se: a relação f_u/f_y for maior que 1,2; a relação r_i/t for menor que 7; e o ângulo de dobramento for igual ou inferior a 120°.

Além das equações que serão apresentadas na seção 5.1, o aumento da tensão de escoamento pode ser calculado também através de ensaios práticos como destacam a NBR14762:2010 e S-100-16. De acordo com essas normas, podem ser considerados ou ensaios de tração ou de compressão em corpos de prova constituídos por segmentos da barra, ou seja, ensaio na seção completa.

3 DIMENSIONAMENTO DE PERFIS FORMADOS A FRIO

O dimensionamento de perfis estruturais de aço fabricados a partir do dobramento de chapas, denominados perfis formados a frio, tem por base as normas brasileiras ABNT NBR 14762:2010 e ABNT NBR 6355:2012 que, por sua vez, baseiam-se, em alguns aspectos, na NBR8800:2008 (Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto para edifícios). Essas normas trazem os requisitos de dimensionamento desses perfis quando submetidos a condições específicas de trabalho e cabe ao engenheiro interpretar corretamente e tais requisitos e realizar o correto dimensionamento.

Os requisitos levam em consideração a estabilidade e análise estrutural definidas na NBR8800:2008. De acordo com a norma “o objetivo da análise estrutural é determinar os efeitos das ações na estrutura” (NBR8800:2008, p. 24). Ainda segundo a norma, a estabilidade individual dos componentes da estrutura deve ser assegurada pelo atendimento das exigências das Seções 9.6 e 9.7 da NBR14762:2010, representando os critérios para barras submetidas a tração e compressão, respectivamente.

Para isso, é necessário entender seu comportamento estrutural, porque os perfis U simples formados a frio possuem algumas características em relação às demais estruturas, como as de concreto ou mesmo as compostas por laminados à quente de aço. O fato dos perfis formados a frio serem constituídos de seções abertas e de pequena espessura, as barras possuem baixa rigidez à torção e podem apresentar problemas de instabilidade, deformações excessivas ou atingir os limites da resistência do aço devido a esforços de torção. A vulnerabilidade desses perfis à torção ocorre até mesmo em carregamentos aplicados no centro geométrico da seção transversal de vigas e de pilares, podendo tornar-se crítico caso a estrutura não seja projetada adequadamente (SILVA, PIERIN e SILVA, 2014).

É necessário conhecer, o empenamento, outro tipo de fenômeno que ocorre nessas estruturas e, a restrição ao empenamento causa esforços internos e o entendimento desses esforços é muito importante e nem sempre é trivial. Além disso, a distorção da seção transversal que consiste em um modo de instabilidade estrutural onde a seção transversal perde sua forma inicial quando submetida a tensões de compressão, é outro fenômeno comum nesses perfis, causando perda significativa da sua capacidade de resistir aos esforços (SILVA, PIERIN e SILVA, 2014).

A NBR14762:2010 apresenta três métodos para o dimensionamento de barras e deve ser adotado um deles para a obtenção dos esforços resistente. No MSE (método da seção efetiva), “a flambagem local é considerada por meio de propriedades geométricas efetivas

(reduzidas) da seção transversal das barras” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 24). O MLE (método das larguras efetivas) também considera as propriedades geométricas efetivas da barra, porém são “oriundas do cálculo das larguras efetivas dos elementos totalmente ou parcialmente comprimidos” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 24). Já o método da resistência direta (MRD) é um método alternativo aos dois apresentados anteriormente e faz a análise de todos os modos de flambagem e seus respectivos esforços críticos através das propriedades da seção bruta e análise da estabilidade elástica.

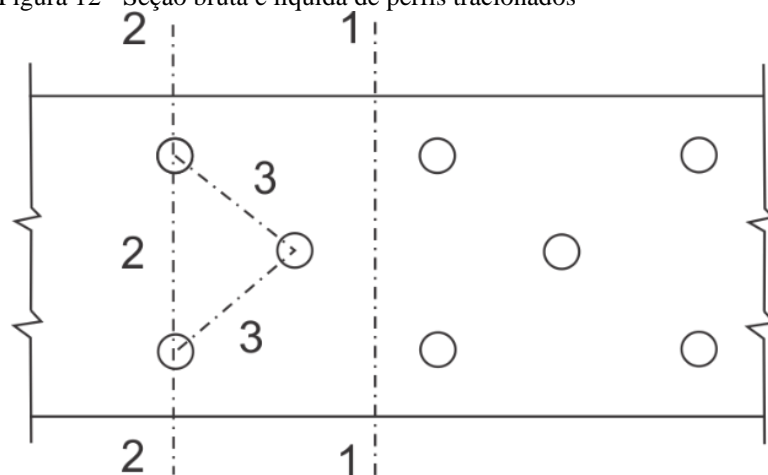
Este trabalho será baseado no dimensionamento através do MSE. Sendo assim, os conceitos e considerações normativas para o dimensionamento de barras tracionadas e comprimidas são apresentados a seguir.

3.1 Barras tracionadas

Barras submetidas a solicitação de tração ocorrem, geralmente, em barras de treliças, em tirantes, em pendurais e em barras de travamento (MELLO, 2012). Os esforços de tração são aqueles que esticam as barras e tendem “a retificar as peças reduzindo o efeito de curvaturas iniciais existentes” (PFEIL, 2009, p. 119). Dessa forma, barras tracionadas são menos suscetíveis a instabilidades e, de acordo com a NBR14762:2010, o cálculo da força axial resistente de cálculo ($N_{t, Rd}$) deve ser feito considerando-se duas verificações: a primeira delas é a verificação ao escoamento da seção bruta e; a segunda verificação, denominada de verificação da capacidade última da seção efetiva, é feita na região das ligações, onde pode haver furos para passagem dos parafusos, que reduzem a área tracionada. Deve-se realizar, também, a verificação da capacidade última da seção efetiva na região fora das ligações, ou seja, em regiões em que haja furos ou recortes que não estejam associados à ligação da barra.

Em barras redondas com roscas nas extremidades deve haver a verificação do escoamento da seção bruta – sem considerar os furos – como também a verificação da ruptura da seção efetiva, enfraquecida pela rosca (MELLO, 2012). A imagem abaixo mostra os dois primeiros requisitos para dimensionamento de barras tracionadas. A linha 1-1 representa a seção bruta do perfil tracionado e as linhas 2-2-2 e 2-3-3-2 representam as seções líquidas considerando os furos da seção transversal.

Figura 12 - Seção bruta e líquida de perfis tracionados



Fonte: ADAPTADO, PFEIL, 2009 pag. 51.

Além desses dois requisitos básicos, para evitar e minimizar o problema de fadiga devido a vibração da barra tracionada, recomenda-se limitar a esbelteza da peça, que é definida pelo índice de esbelteza ($\lambda = \frac{L}{r_{\min}}$), tomado como a maior relação entre o comprimento destravado da barra e o raio de giração mínimo correspondente da seção transversal (MELLO, 2012). De acordo com a NBR14762:2010, para peças tracionadas, essa relação não deve exceder 300. As equações para o cálculo da força axial resistente de cálculo ($N_{t, Rd}$) são apresentadas na seção 5.2.1.

3.2 Barras comprimidas

Segundo Mello (2012, p. 50), “barras comprimidas são encontradas em treliças, pilares não submetidos a flexão e às vezes, em barras de travamento”. Segundo Pfeil (2009, p. 119) “ao contrário do esforço de tração, que tende a retificar as peças reduzindo o efeito de curvaturas iniciais existentes, o esforço de compressão tende a acentuar esse efeito”.

O esforço de compressão pode ser transmitido através dos elementos de ligação e, por isso, os furos para os elementos de fixação em barras comprimidas não influenciam no seu dimensionamento. Entretanto, quando os furos não são preenchidos, torna-se necessário a determinação da área líquida da barra, para a determinação da resistência em função do escoamento daquela área efetiva (MELLO, 2012).

Sendo assim, a NBR14762:2010 enuncia que a força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c, Rd}$) deve ser tomada como o menor valor entre: a força axial resistente de cálculo devido à instabilidade global da barra por, flexão, torção ou por flexo-torção e; a força axial

resistente de cálculo devido à instabilidade por distorção da seção transversal. Além disso, as barras comprimidas não devem ter índice de esbeltez (λ) superior a 200.

3.2.1 Flambagem elástica

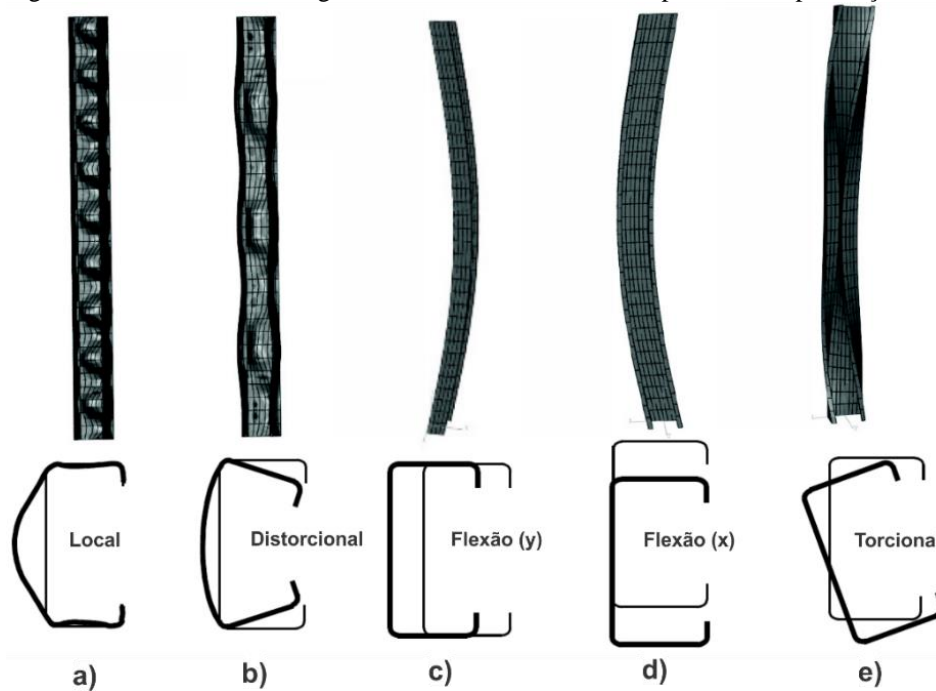
Um conceito extremamente importante no dimensionamento de peças comprimidas e fletidas é a flambagem. Esse fenômeno é definido como uma deflexão lateral que ocorre nas barras e pode resultar em uma falha repentina e dramática da estrutura e, por isso, é preciso dedicar especial atenção ao projeto desses elementos de modo que suportem com segurança as cargas sem sofrer flambagem, ou seja, de modo que suportem uma carga crítica de flambagem (HIBBELER, 2011). Pfeil (2009, p.119) também diz que “os deslocamentos laterais produzidos compõem o processo conhecido por flambagem por flexão que, em geral, reduz a capacidade de carga da peça em relação ao caso da peça tracionada”.

A flambagem é dividida em elástica e inelástica e, de acordo com a AISI S100-16, a flambagem elástica ocorre com uma carga na qual o equilíbrio é neutro entre a peça sem deformação e a deformação por flambagem. Segundo Hibbeler (2011), a flambagem inelástica acontece quando a carga ultrapassa o limite de proporcionalidade do material ou a tensão de escoamento. O autor acrescenta que a flambagem inelástica acontece em colunas ou barras com menores índices de esbeltez. Já a flambagem elástica acomete as barras com índices maiores.

Os perfis formados a frio são ainda mais vulneráveis a este fenômeno devido à utilização de chapas de pequena espessura. Dessa forma, “é necessária a utilização de critérios de dimensionamento que levem em consideração os diferentes modos de instabilidade a que estão sujeitos estes perfis” (SALES, 2017, p.14).

A AISI S100-16 e NBR14762:2010 enunciam que, os perfis estruturais formados a frio com paredes finas podem ter, pelo menos três relevantes tipos de flambagem elástica: local, distorcional e global. A Figura 13 ilustra alguns dos modos de flambagem elástica. Dessa forma, segundo a NBR14762:2010, a força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c, Rd}$) deve ser tomada como o menor valor calculado entre os tipos de flambagem mencionados anteriormente.

Figura 13 - Modos de flambagem elástica local, distorcional, por flexão e por torção

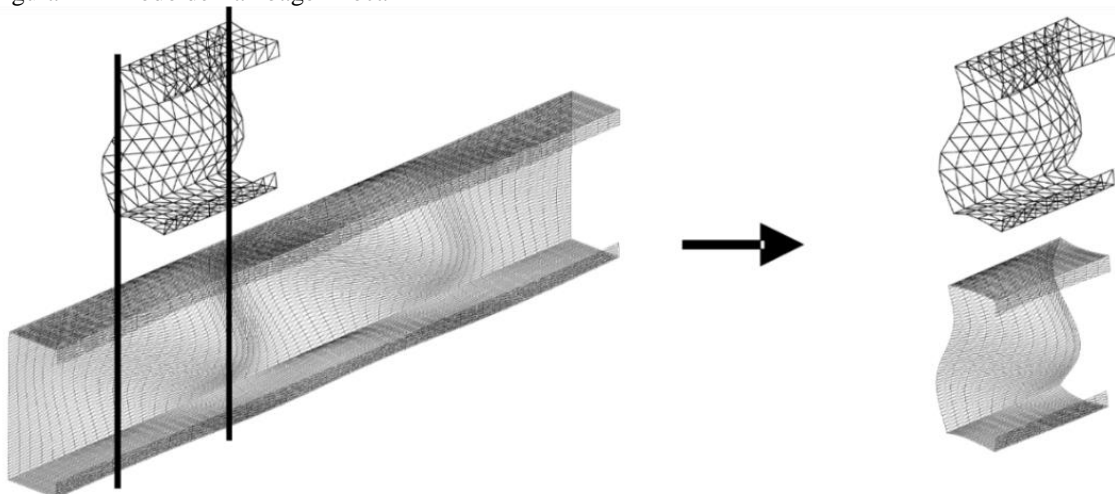


Fonte: ADAPTADO, AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE, 2016, pag. 2-1.

3.2.1.1 Flambagem local

A flambagem local envolve significativa distorção da seção transversal, porém envolve somente a rotação, sem translação, das linhas de dobra da barra, conforme Figura 13 a) (AISI S100-16, 2016). Segundo Sales (2017, p.15), “a flambagem local se caracteriza pelo enrugamento ou ondulações de um ou mais elementos do perfil sem que haja deslocamento das arestas da seção transversal do perfil”.

Figura 14 - Modo de flambagem local



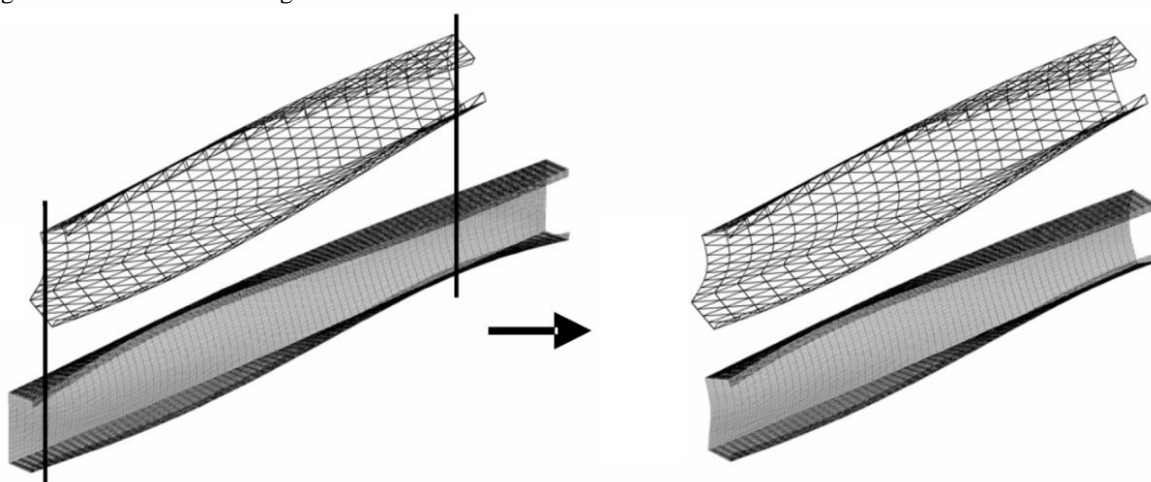
Fonte: ADAPTADO, AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE, 2016, pag. 2-14.

Esse tipo de instabilidade, apresentado também na Figura 14, é típico de perfis com paredes finas, como os perfis formados a frio e, é caracterizada pela instabilidade de uma região de um elemento da seção, que depende da relação (b/t) , largura e espessura do elemento, e ocorrerá mais facilmente quanto maior for o valor dessa relação (MELLO, 2012).

3.2.1.2 Flambagem distorcional

A flambagem distorcional envolve a translação, potencial rotação das linhas de dobra do perfil e a distorção de um ou mais elementos da seção transversal, como exemplo os elementos com bordas vinculadas (AA) e elementos com borda livre (AL), como mencionado na seção 2.1, e mostrado na Figura 13 b) e Figura 15. (AISI S100-16, 2016). Segundo Salles (2017, p.16), “este fenômeno caracteriza-se pela perda de estabilidade do elemento comprimido, ou seja, abaulamento da alma e conseqüente rotação das mesas do perfil resultando em deslocamentos de suas arestas ocorrendo uma abertura ou fechamento destas”. A Figura 15 mostra os tipos de flambagem distorcional.

Figura 15 - Modo de flambagem distorcional



Fonte: ADAPTADO, AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE, 2016, pag. 2-14.

Segundo NBR14762:2010, as seções transversais da barra podem apresentar a flambagem distorcional como o modo crítico e, geralmente, ocorrem em perfis abertos com enrijecedores de borda e paredes esbeltas podendo acontecer para carregamentos inferiores ao modo de flambagem local. Ainda de acordo com a NBR14762 (2010, p.32), “os perfis U simples (sem enrijecedores de borda) não são passíveis de flambagem distorcional, dispensando-se, portanto, tal verificação nesse caso”.

3.2.1.3 Flambagem global

A flambagem global não envolve distorção da seção transversal (AISI S100-16, 2016). Segundo a AISI S100-16 e Salles (2017), a flambagem global inclui três formas distintas: flambagem por flexão, por torção e por flexo-torção. Na flambagem por flexão, Figura 13 c) e d), a seção transversal do perfil desloca-se lateralmente (SALLES, 2017). Mello (2012) acrescenta que, esse fenômeno está associado ao índice de esbeltez da barra (λ), no qual a relação é inversamente proporcional, quanto maior o índice de esbeltez menor será a resistência da barra a compressão.

Segundo Salles (2017), na flambagem por torção, Figura 13 e) o perfil sofre rotação em torno do seu eixo longitudinal. E quando há uma interação entre os dois modos anteriores, caracteriza-se como flambagem por flexo-torção, na qual o perfil sofre uma translação juntamente com rotação. Mello (2012) acrescenta que, a flambagem por torção ou flexo-torção leva em consideração as características geométricas dos perfis e as seções assimétricas, tais como perfil cantoneira, e seções com paredes finas favorecem esse tipo de flambagem.

4 ANÁLISE METALOGRÁFICA

Diversos fatores econômicos e técnicos são responsáveis pela evolução do aço como material de engenharia. O conhecimento adquirido sobre as propriedades, desempenho, estrutura, e a influência do processamento dos aços sobre estas características permitiu a melhoria das ligas de aço existentes e o desenvolvimento de novas ligas. A metalografia, que consiste na análise das relações entre a estrutura dos materiais na escala de micrômetros até milímetros e suas propriedades, é uma das ferramentas importantes no desenvolvimento deste conhecimento. Esse método foi estabelecido primeiramente por Henry Clifton Sorby em Sheffield, na Inglaterra, na década de 1860 e complementado por um conjunto de outras ferramentas de caracterização dos metais (COLPAERT, 2008).

Sendo assim, Colpaert (2008, p.2) diz que:

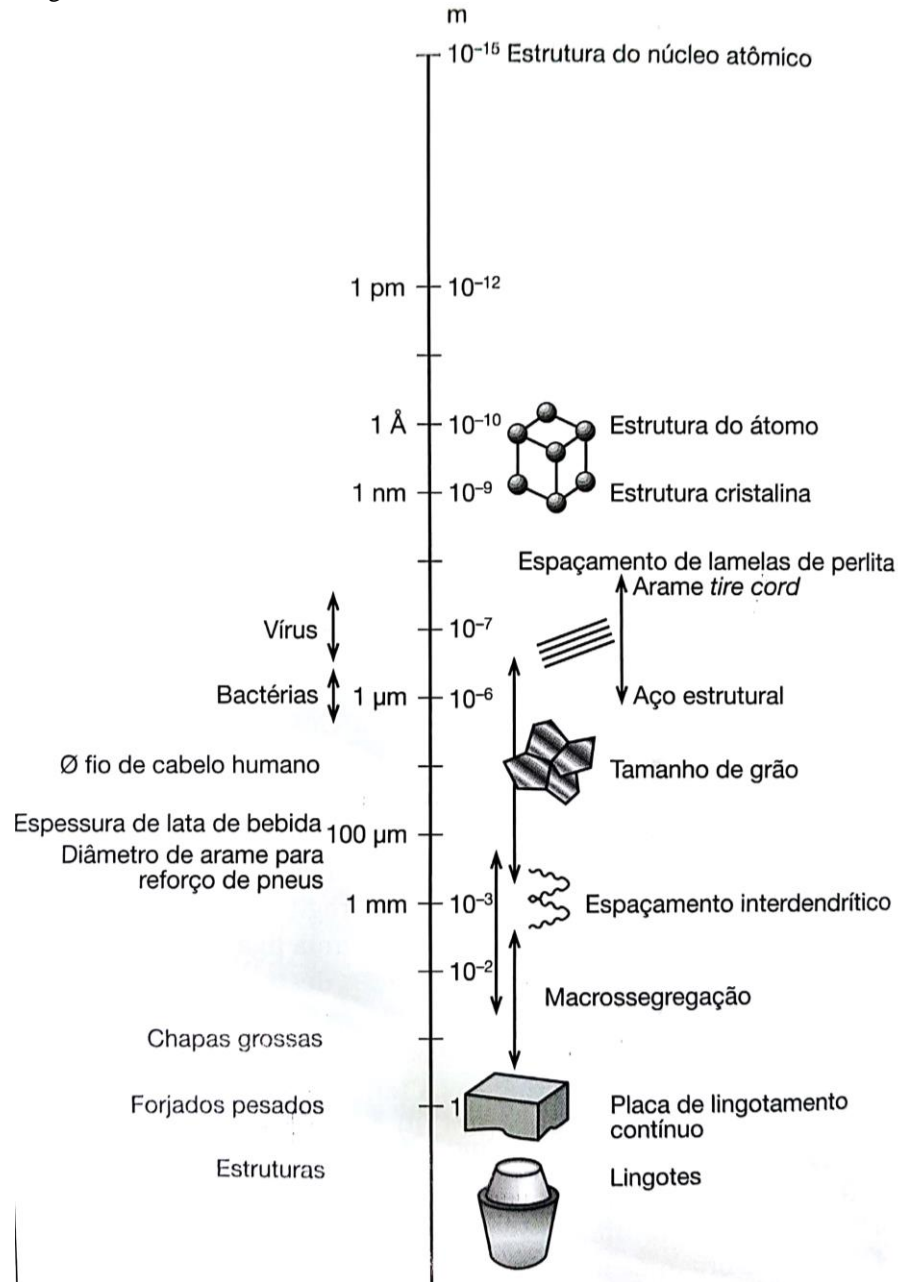
A metalografia se tornou tão essencial à compreensão do comportamento dos aços que praticamente todos os cursos de engenharia de materiais se dedicam um tempo significativo a seu ensino e é praticamente impossível encontrar uma indústria que produza ou processe aço que não utilize ferramentas metalográficas em alguma etapa de seu desenvolvimento, controle de qualidade ou análise de falha.

As técnicas metalográficas de micrografia e macrografia aplicam-se à caracterização das estruturais determinantes para o desempenho dos metais que estão na faixa de 10 nm até 1 mm. Daí vem a importância da metalografia no desenvolvimento e controle das características dos aços (COLPAERT, 2008).

4.1 Estrutura micrográfica dos aços

Em praticamente todos os aços, os átomos se organizam regularmente em cristais e o modo como esses átomos e os cristais se organizam define uma série de características deste metal (COLPAERT, 2008). A Figura 16 apresenta as características estruturais dos aços em suas respectivas escalas e as dimensões aproximadas de alguns objetos, para referência comparativa. O tamanho do grão se situa na mesma faixa de escala de um fio de cabelo e representa uma medida muito importante na caracterização dos aços.

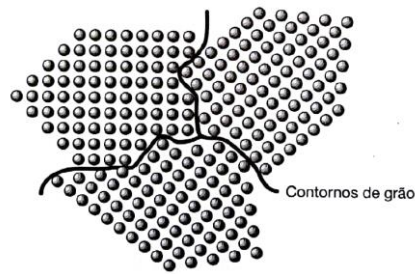
Figura 16 - Escala das estruturas dos materiais



Fonte: COLPAERT, 2008, pág. 4.

As transformações de fases durante a fabricação do aço influenciam diretamente na estrutura cristalina – arranjos de átomos regulares e repetitivos – que se observam em produtos de aços. Em geral, ocorre a formação de vários núcleos das novas fases ao longo da massa de metal em transformação. Os núcleos formados ao longo da massa de metal apresentam orientações cristalográficas diferentes, de modo que, o encontro desses cristais forma os contornos de grãos, onde os átomos estão entre duas estruturas cristalinas diferentes, conforme imagem abaixo (COLPAERT, 2008).

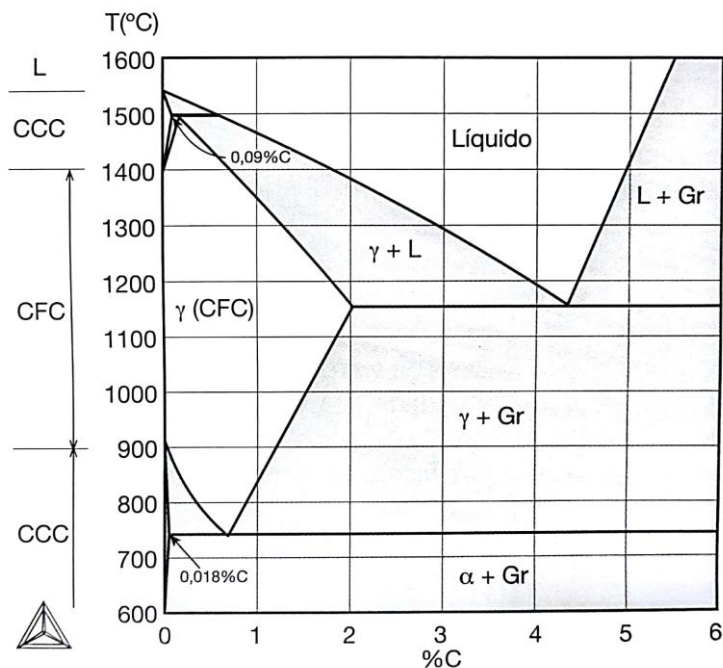
Figura 17 - Contornos de grão em esquema bidimensional



Fonte: COLPAERT, 2008, pág. 26.

Os diferentes arranjos estruturais do aço podem ser representados através de um diagrama de equilíbrio de fases. Dependendo da temperatura e da quantidade de carbono, a liga apresenta diferentes fases e estruturas cristalinas. A fase (α) representa a ferrita (estrutura presente no ferro puro), a fase (γ) a austenita e a fase (Gr) representa a Cementita (COLPAERT, 2008).

Figura 18 - Diagrama de equilíbrio de fases Fe-C.



Fonte: COLPAERT, 2008, pág. 6.

4.1.1 Tamanho de grão

Segundo Colpaert (2008), o tamanho de grão influencia em quase todas as propriedades mecânicas dos aços. Com isso, as estimativas do tamanho dos grãos estão entre as medidas mais importantes da metalografia quantitativa. Ainda de acordo com o autor, uma das medidas mais

comuns é o tamanho de grão ASTM calculado pelo número (G). Dentre os métodos de obtenção do tamanho do grão, a ASTM E112-12 descreve o método da interceptação linear média. Segundo a norma, trata-se de um método mais conveniente em relação aos outros descritos pela norma e consiste em desenhar linhas com direções aleatórias de comprimento conhecido sobre a imagem metalográfica obtida e, realizar a contagem de intersecções entre os contornos de grão e as linhas desenhadas. A recomendação é que tenha pelo menos 50 intersecções. Dessa forma, calcula-se a intersecção linear média através do quociente entre o comprimento da linha e o número de intersecções.

O tamanho do grão é definido através da equação apresentada na seção 5.4.3.1 A Figura 19 mostra as características básicas dos tamanhos de grãos padronizados pela ASTM E112-12. Quanto maior o número G, menor é o tamanho do grão.

Figura 19 - Relações do tamanho de grão ASTM

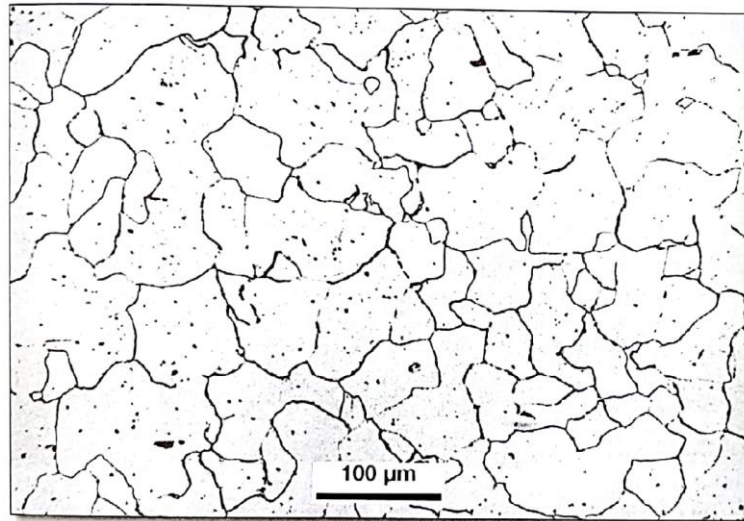
Tamanho do Grão G	Grãos/Unidade de Área		Área média do grão		Diâmetro médio		Compr. méd. de interceptação	
	No./pol ²	No./mm ²	mm ²	µm ²	mm	µm	mm	µm
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5

Fonte: ADAPTADO, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012, pág. 8.

4.1.2 Ferrita

Segundo Colpaert (2008), a estrutura chamada ferrita se apresenta em aços de baixo teor de carbono. A Figura 20 abaixo apresenta a característica básica deste tipo de estrutura em um aço de baixo teor de carbono e se mostra com coloração mais clara devido à ausência de carbono.

Figura 20 - Representação básica da ferrita.

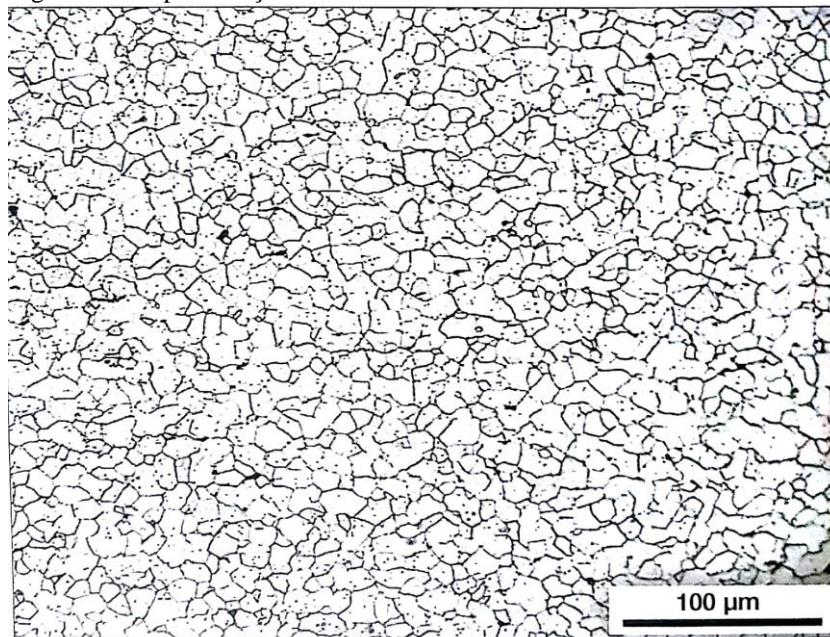


Fonte: COLPAERT, 2008, pág. 97.

4.1.3 Cementita

A cementita começa a aparecer distribuída ao longo do produto quando a solubilidade do carbono na ferrita é excedida e se caracteriza como uma segunda fase dispersa, como mostra a Figura 21 através dos pontos mais escuros (COLPAERT, 2008).

Figura 21 - Representação básica da cementita

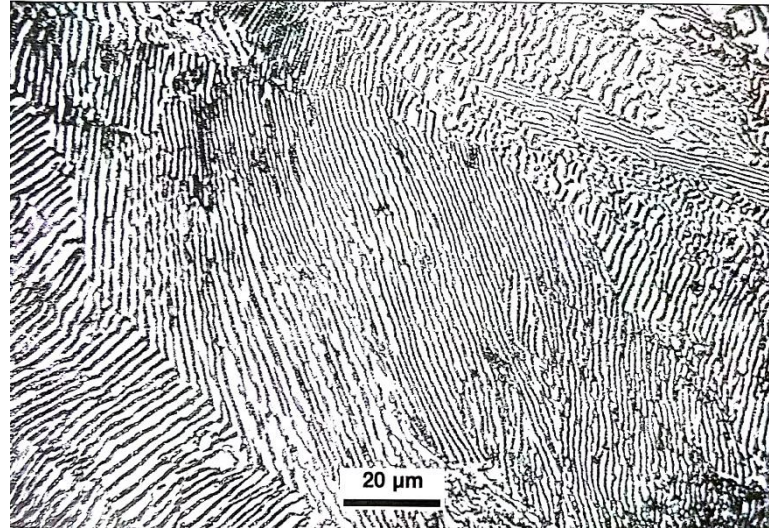


Fonte: COLPAERT, 2008, pág. 102.

4.1.4 Perlita

Colpaert (2008) enuncia que, quando o aço apresenta quantidade significativa de carbono a fase perlita aparece. Trata-se de um conjunto de lamelas de ferrita e cementita com a mesma orientação metalográfica representada pela Figura 22.

Figura 22 - Representação básica de colônias de perlita

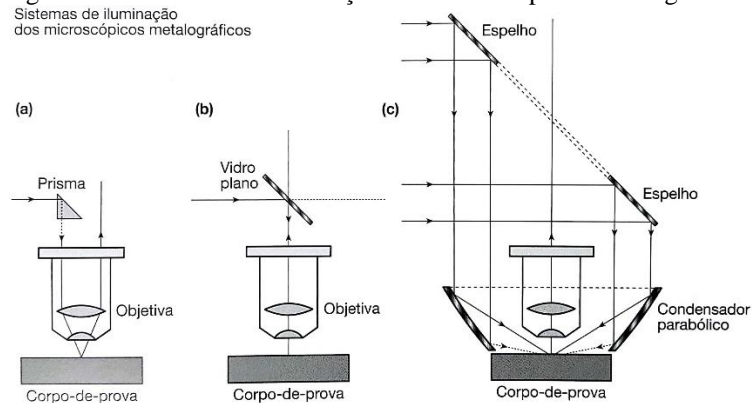


Fonte: COLPAERT, 2008, pág. 107

4.2 Técnica metalográfica

Segundo Colpaert (2008), dentre as diversas técnicas de observação da microestrutura dos aços, a mais comum é a microscopia óptica. Nessa técnica, aplica-se luz visível que incide sobre a amostra e é refletida até o observador. A emissão de luz pode ser inclinada ou oblíqua, iluminação paralela ao eixo ou iluminação em campo escuro conforme imagem abaixo.

Figura 23 - Sistemas de iluminação dos microscópicos metalográficos



Fonte: COLPAERT, 2008, pág. 69

4.2.1 Preparação de amostras para microscopia ótica

A técnica de preparação de amostras para realização de um ensaio micrográfico em microscópio ótico pode ser dividida em seis fases: escolha e local do material a ser estudado; obtenção de uma superfície plana e polida no local escolhido para estudo; exame microscópico para observação das ocorrências visíveis sem ataque químico; ataque da superfície por um reagente químico adequado; exame ao microscópio para observação da microestrutura e; registro do aspecto observado (COLPAERT, 2008).

Segundo o autor, as dimensões dos corpos-de-prova para o exame micrográfico podem ser limitadas por diversos aspectos. O peso máximo suportado pelo porta-amostra do microscópio, assim como as dimensões da câmara podem limitar a maior dimensão para a análise micrográfica.

“A preparação da superfície de interesse envolve o lixamento em lixadeiras motorizadas seguindo uma sequência de papéis de lixa de carboneto de silício (SiC), com resfriamento e lubrificação por água” (Colpaert, 2008, p.71). Segundo ele, a sequência usual de lixas é: 100 ou 120 ou 180, 240, 320, 400, 600 e, eventualmente, 1200. Além disso, o autor acrescenta que, deve-se mudar a 90° a direção de lixamento e polimento ao se passar de um abrasivo para o outro e, geralmente, submete-se a amostra pelo menos o dobro do tempo necessário para eliminar os riscos da lixa anterior (COLPAERT, 2008).

Após o emprego das lixas, o polimento é realizado, também com auxílio de um disco giratório, porém, agora, com um feltro, sobre a qual aplica-se uma leve camada de abrasivo. Os abrasivos mais comumente empregados são a alumina e o diamante. A verificação da qualidade do polimento é realizada através de um exame da superfície ao microscópio, depois de lavá-la em água com um pequeno chumaço de algodão e secá-la imediatamente aplicando-se um jato de ar quente e passando-se na superfície um pouco de algodão com álcool para evitar manchas de secagem (COLPAERT, 2008).

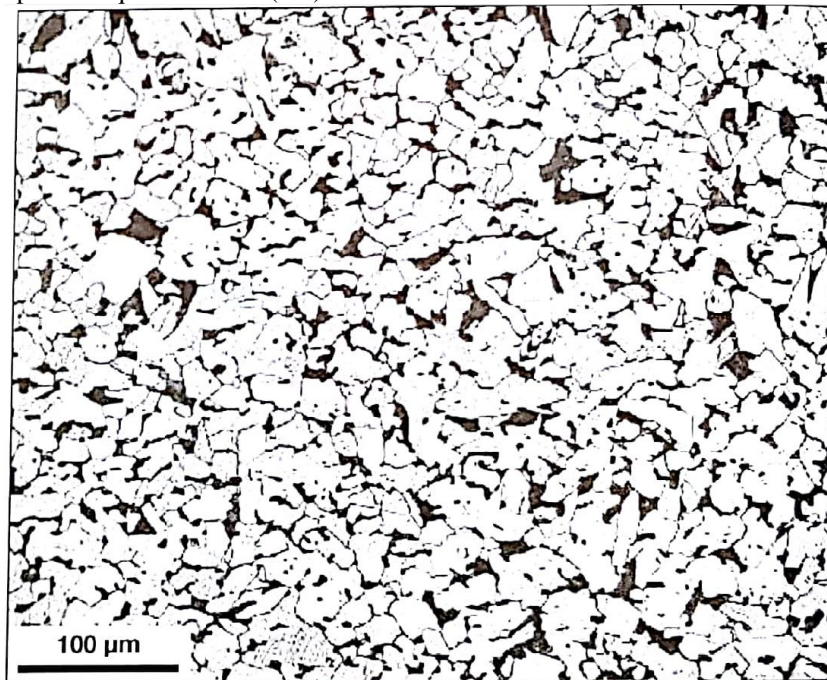
A operação posterior ao polimento, é o exame ao microscópio sem ataque e, além de avaliar a qualidade do polimento realizado, também tem a função de avaliar características estruturais que são visíveis nesta condição, tais como trincas e porosidades (COLPAERT, 2008).

O ataque de superfície é realizado, primeiramente, escolhendo o reagente a ser empregado. O nital é um tipo de reagente composto por ácido nítrico (HNO_3) em solução de etanol (álcool etílico). Sua concentração varia de 1 a 5% e esse reagente ataca os contornos de

grão. O ataque é feito, agitando-se o corpo-de-prova com a superfície polida mergulhada no reativo posto numa pequena cuba (COLPAERT, 2008).

Terminado o ataque, lava-se imediatamente a superfície com álcool e, realiza-se a secagem com auxílio de algodão, álcool e jato de ar quente (COLPAERT, 2008). A Figura 24 mostra um exemplo de aço AISI 1010, Ferrita e Perlita com fração volumétrica de 10% após o ataque com nital.

Figura 24 - Representação de uma superfície de aço de baixo teor de carbono após o ataque com Nital (2%)



Fonte: COLPAERT, 2008, pág. 112

5 METODOLOGIA

A metodologia do trabalho começa através da leitura e estudo das normas vigentes para o dimensionamento de perfis formados a frio e, tratam-se das normas NBR14762:2010 e NBR6355:2012. Além disso, foi consultada, apenas com mérito de referência, a norma norte-americana CSA-S136-16 (North American specification for the design of cold-formed steel structural members).

Dessa forma, foi possível elaborar fluxogramas de cálculo para a obtenção dos esforços resistentes de cálculo quando os perfis U simples formados a frio são submetidos aos esforços de tração e compressão, e podem ser consultados nos apêndices A e B.

Os perfis sob o escopo deste trabalho foram definidos seguindo os perfis “U” simples formados a frio padronizados pela NBR6355:2012, totalizando uma quantidade de 125 perfis com suas respectivas características e propriedades geométricas, conforme Anexo A. Sendo assim, os próximos capítulos mostram, primeiramente, o cálculo do aumento da tensão de escoamento devido ao efeito do trabalho a frio, a sistemática do cálculo dos esforços resistentes, a elaboração do algoritmo para o cálculo automático desses esforços, e a análise metalográfica realizada para verificar as mudanças microestruturais em chapa submetida ao dobramento.

5.1 Aumento da resistência ao escoamento devido ao efeito do trabalho a frio

De acordo com a NBR14762:2010, a resistência ao escoamento do aço virgem (f_y), associada a uma determinada seção transversal, pode ser substituída pela resistência ao escoamento do aço modificada (f_{ya}) levando em consideração o efeito do trabalho a frio, como já mencionado na seção 2.5. Esse recurso normativo será aplicado para barras submetidas a tração, compressão, flexão simples e composta e barras com painel conectado à mesa tracionada. O Apêndice A apresenta o fluxograma de cálculo para esta seção.

O primeiro requisito apresentado pela norma é aplicado para barras submetidas a compressão e flexão. Trata-se da limitação do índice de esbeltez reduzido da seção completa (λ_p), que deve ser menor ou igual a 0,673, no qual a área efetiva da seção transversal da barra (A_{ef}) deve ser igual a área bruta da seção transversal da barra (A) e, o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida ($W_{c\ ef}$) deve ser igual ao módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida (W_c).

Além disso, para todos os tipos de esforços, a relação entre a tensão de ruptura do material (f_u) e a tensão de escoamento (f_y) deve ser maior que 1,2. A relação entre o raio interno de dobramento (r_i) e a espessura da chapa (t) deve ser menor ou igual a 7. O ângulo de dobramento (α) deve ser menor ou igual a 120° .

Com esses requisitos atendidos, passa-se para o cálculo da tensão de escoamento modificada (f_{ya}) seguindo as equações a seguir. Primeiramente, realiza-se o cálculo dos parâmetros empregados no cálculo da resistência ao escoamento da região das dobras (B_c) e (m).

$$B_c = 3,69 \left(\frac{f_u}{f_y} \right) - 0,819 \left(\frac{f_u}{f_y} \right)^2 - 1,79 \quad (1)$$

$$m = 0,192 \left(\frac{f_u}{f_y} \right) - 0,068 \quad (2)$$

A resistência ao escoamento do aço na região das dobras do perfil (f_{yc}) é dada por:

$$f_{yc} = \frac{B_c f_y}{\left(\frac{r_i}{t} \right)^m} \quad (3)$$

O parâmetro empregado no cálculo da resistência ao escoamento modificada (C) para barras submetidas a tração e compressão é calculado através da Equação 4.

$$C = 2 \left[\frac{\frac{\pi(r_i+t)^2}{2} - \frac{\pi r_i^2}{2}}{4} \right] \quad (4)$$

Sendo assim, a resistência ao escoamento do aço modificada (f_{ya}) é calculada através da Equação 5.

$$f_{ya} = C f_{yc} + (1-C) f_{yf} \leq f_u \quad (5)$$

Onde:

f_{yf} – resistência ao escoamento, média, para as partes planas do perfil, e pode ser adotado como igual a resistência de escoamento do aço virgem (f_y).

5.2 Cálculo dos esforços resistentes

A realização dos cálculos seguiu algumas considerações normativas em relação às características de dimensionamento e do material dos perfis e que foram apresentadas na seção 3. A seguir são apresentadas as sistemáticas de cálculo para obtenção dos esforços resistentes de tração, compressão e flexão.

5.2.1 Esforço axial de tração resistente de cálculo

A obtenção do esforço resistente de cálculo de barras submetidas a tração ($N_{t, Rd}$) é relativamente simples. Como mencionado na seção 3., o dimensionamento deve considerar a verificação do escoamento da seção bruta e a verificação da capacidade última da seção efetiva, que é feita na região das ligações, onde pode haver furos para passagem dos parafusos, que reduzem a área tracionada. Porém, o presente trabalho não irá considerar as regiões das ligações, porque não tem influência na avaliação do efeito do trabalho a frio. Além disso, a limitação de esbeltez não foi considerada. Dessa forma, a verificação será feita apenas para o escoamento da seção bruta e abaixo é mostrada a única equação. O esforço resistente específico de cálculo também foi considerado, basta calcular o quociente entre $N_{t, Rd}$ e o peso do perfil, considerando 1 metro de comprimento.

$$N_{t, Rd} = \frac{A f_y}{\gamma} \quad (6)$$

Onde:

A - Área bruta da seção transversal da barra

f_y - Resistência ao escoamento do aço

γ – Coeficiente de ponderação da resistência a tração, adotado igual a 1,10.

5.2.2 Esforço axial de compressão resistente de cálculo

A obtenção do esforço resistente de cálculo de barras submetidas a compressão levará em consideração o dimensionamento somente na flambagem global para perfis monossimétricos. Esta consideração foi feita porque, de acordo com a NBR14762:2010 os perfis “U” simples não são passíveis de verificação da flambagem distorcional, conforme pagina 32 da norma. A limitação de esbeltez do perfil não é o fator principal da análise, porém foi indicada porque os esforços serão calculados para os comprimentos efetivos de 0,1 metro, 0,5 metro, 1 metro, 1,5 metros e 2, 2,5, 3, 3,5, e 4 metros. Em alguns casos, a adoção desses comprimentos, ultrapassa o limite de esbeltez de 200 informado pela norma, porém será indicado quando o perfil não atender a este requisito. Dessa forma, as equações são apresentadas a seguir, de acordo com a seção 9.7.2.2 da NBR14762:2010. O esforço resistente específico de cálculo para compressão também foi considerado, basta calcular o quociente entre $N_{c, Rd}$ e o peso do perfil, considerando os comprimentos mencionados acima.

Foi elaborado um fluxograma de cálculo de perfil U simples submetido a compressão centrada e pode ser verificado no Apêndice B. O primeiro cálculo é da força axial crítica de flambagem elástica (N_e) e é o menor valor obtido por meio das equações 7, 8 e 10.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(k_x L_x)^2} \quad (7)$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(k_y L_y)^2} \quad (8)$$

Onde:

E - Módulo de elasticidade do aço, adotado igual a 200 GPa

I_x ; I_y - momentos de inércia da seção bruta em relação aos eixos principais x e y, respectivamente

$k_x L_x$ - Comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo x. k_x considerado igual a 1. L_x Considerado para os comprimentos apresentados anteriormente.

$k_y L_y$ - Comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo y. k_y considerado igual a 1. L_y considerado igual a L_x .

Para calcular a força axial crítica de flambagem global elástica por torção (N_{ez}) e a força axial crítica de flambagem global elástica por flexo-torção (N_{exz}), primeiro, é necessário

calcular o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção (r_0) indicado abaixo.

$$r_0 = (r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2)^{0,5} \quad (9)$$

Dessa forma:

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left(\frac{\pi E C_w}{(k_z L_z)^2} + GJ \right) \quad (10)$$

Onde:

C_w - Constante de empenamento da seção transversal

J - Momento de inércia à torção uniforme

$k_z L_z$ - Comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo z. k_z considerado igual a 1. L_z considerado igual a L_x .

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2 \left(1 - \left(\frac{x_0}{r_0} \right)^2 \right)} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez} \left(1 - \left(\frac{x_0}{r_0} \right)^2 \right)}{N_{ex} + N_{ez}^2}} \right] \quad (11)$$

O índice de esbeltez reduzido (λ_0) associado à instabilidade global considera o menor valor da força axial crítica de flambagem elástica (N_e) calculado anteriormente e é dado pela Equação 12.

$$\lambda_0 = \left(\frac{A f_y}{N_e} \right)^{0,5} \quad (12)$$

O cálculo do fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à instabilidade global (χ) considera o valor do índice de esbeltez reduzido como mostra as equações abaixo.

Se:

$$\lambda_0 \leq 1,5 \quad (13)$$

$$\chi = 0,658\lambda_0^2 \quad (14)$$

E se:

$$\lambda_0 > 1,5 \quad (15)$$

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (16)$$

O cálculo da área efetiva (A_{ef}) leva em consideração as equações 17 a 24. Primeiramente, calcula-se a relação (η) entre a largura da mesa (b_f) e a largura da alma (b_w). O valor dessa relação deve estar entre 0,1 e 1,0, conforme indicado nas equações 17 e 18.

$$\eta = \frac{b_f}{b_w} \quad (17)$$

$$0,1 \leq \eta < 1,0 \quad (18)$$

O coeficiente de flambagem local para a seção completa em barras submetidas a compressão centrada (k_1) para seção U simples é dado pela Equação 19.

$$k_1 = 4,0 + 3,4\eta + 21,8\eta^2 - 174,3\eta^3 + 319,9\eta^4 - 237,6\eta^5 + 63,6\eta^6 \quad (19)$$

Dessa forma, a força axial de flambagem elástica (N_1) é calculada por meio da Equação 20.

$$N_1 = k_1 \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2) \left(\frac{b_w}{t}\right)^2} A \quad (20)$$

Onde:

ν - Coeficiente de Poisson do aço, adotado igual a 0,3

t - Espessura da chapa ou do elemento

O índice de esbeltez reduzido da seção completa (λ_p) é dado pela Equação 21.

$$\lambda_p = \left(\frac{\chi A f_y}{N_l} \right)^{0,5} \quad (21)$$

Assim, o cálculo da área efetiva da seção completa (A_{ef}) considera o valor do índice de esbeltez reduzido da seção completa (λ_p) como mostra as equações abaixo.

Se:

$$\lambda_p \leq 0,776 \quad (22)$$

$$A_{ef} = A \quad (23)$$

E se:

$$\lambda_p > 0,776 \quad (24)$$

$$A_{ef} = A \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_p^{0,8}} \right) \frac{1}{\lambda_p^{0,8}} \quad (25)$$

Com isso, o esforço resistente de cálculo de barras submetidas compressão ($N_{c, Rd}$) é dado segundo a Equação 26.

$$N_{c, Rd} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma} \quad (26)$$

Onde, nesse caso:

γ – Coeficiente de ponderação da resistência a compressão, adotado igual a 1,20.

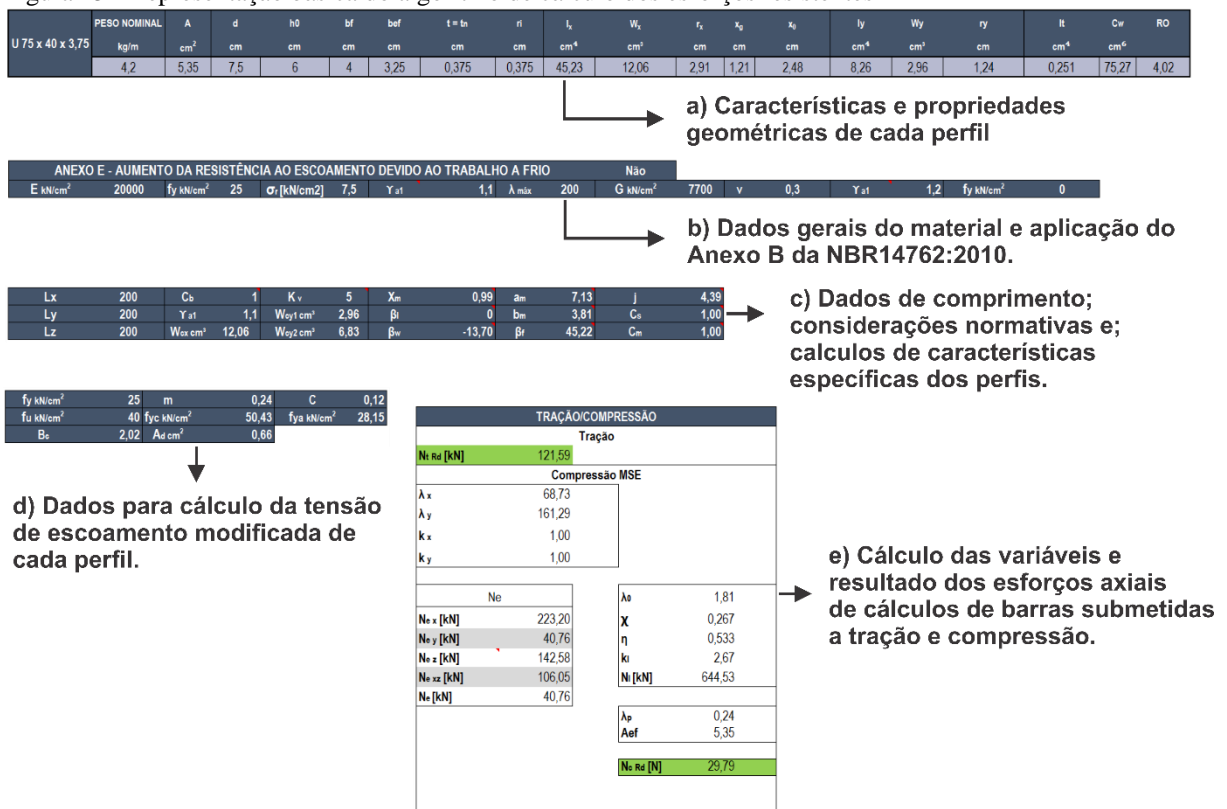
5.3 Algoritmo para o cálculo dos esforços resistentes

No intuito de otimizar e maximizar o processo de obtenção dos esforços resistentes de cálculo de perfis U simples formados a frio submetidos aos esforços de tração e compressão,

considerando a tensão de escoamento do material virgem, como também o aumento da tensão de escoamento devido ao trabalho a frio, desenvolveu-se um algoritmo através de uma planilha. O primeiro passo para executar o algoritmo foi a tabulação de todas as características e propriedades geométricas dos perfis U simples, de acordo com o anexo A, que seguem as definições da NBR6355:2012. Após a elaboração dos fluxogramas de cálculo (apêndices A e B) e através da sistemática de cálculo apresentada nos itens anteriores foi possível estabelecer uma sequência de etapas para o algoritmo através de outra aba na planilha.

As características e propriedades geométricas de um perfil são carregadas em outra parte da planilha através da seleção de um campo onde se escolhe o perfil desejado, conforme figura 25 a). Os dados gerais, propriedades do material e as principais considerações normativas são mostradas em outra área diferente, como apresentado na figura 25 b). As propriedades geométricas específicas dos perfis, assim como o comprimento adotado são calculados em outra região da planilha, como indicado na figura 25 c). As variáveis para o cálculo da tensão de escoamento modificada de cada perfil são mostradas na figura 25 d). Por fim, a obtenção dos esforços axiais resistentes de cálculo para tração e compressão são apresentados na Figura 25 e).

Figura 25 - Representação básica do algoritmo de cálculo dos esforços resistentes



Fonte: O autor.

5.4 Análise metalográfica

O objetivo da análise metalográfica é verificar as alterações microestruturais que o trabalho a frio promove no aço, principalmente, as alterações geométricas dos grãos e se ocorre uma alteração do tamanho do grão quando uma peça é dobrada. Sendo assim, não se trata de uma análise detalhada dos grãos e as fases metalográficas do aço, porque essa não é a proposta do trabalho.

Para isso, a sistemática da análise seguirá as definições de Colpaert (2008) e podem ser verificadas na seção 4.2. Primeiramente, será abordada a escolha do material e local a ser estudado, assim como os motivos que levaram a essa escolha. A preparação da amostra para análise metalográfica é outro fator importante, por último o procedimento para o exame da microestrutura e o cálculo do tamanho de grão.

5.4.1 Escolha do material e local a ser estudado

O material escolhido para a análise foi uma chapa de aço carbono CST COR 400 com 0,08% de carbono e espessura de 4,75mm. Caracteriza-se como um aço de baixo carbono utilizada na fabricação de reservatórios metálicos de água e tem característica de suportar bem a deformação permanente além de boa resistência a corrosão. Esse material foi escolhido, principalmente pela capacidade de se deformar e também devido a facilidade de acesso pela disponibilização dessa chapa por uma metalúrgica. O certificado de qualidade da chapa pode ser verificado no Anexo B.

A chapa foi cortada e dobrada em uma prensa dobradeira para ficar com o formato de um perfil U simples de 150x40x4,75, conforme Anexo A. A máquina utilizada para realizar a dobra foi uma dobradeira Durma AD-R 37175 e está representada na Figura 26.

Figura 26 - Dobradeira tipo Press-brake



Fonte: O autor.

A condição final do perfil após o dobramento é mostrada na Figura 27.

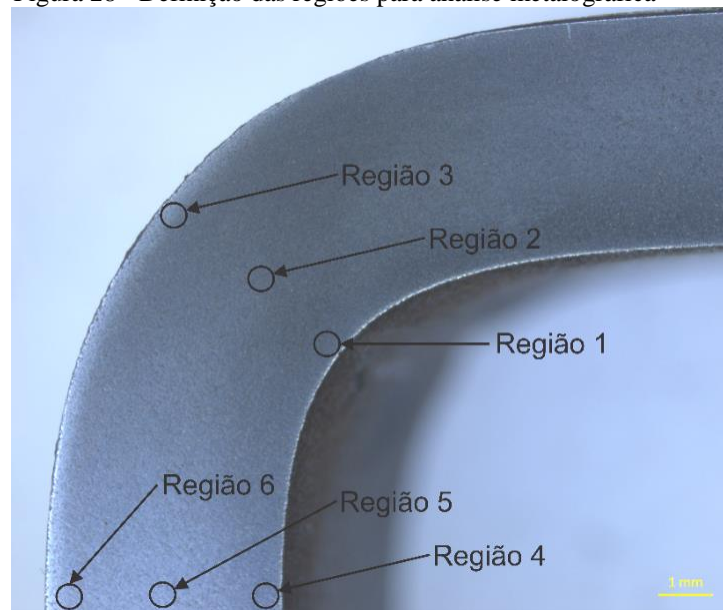
Figura 27 - Perfil U 150x40x4,75 dobrado



Fonte: O autor.

A análise metalográfica foi definida para seis regiões diferentes do perfil. Basicamente, verificou-se as regiões onde sofreram deformação plástica e regiões que não tiveram influência do trabalho mecânico a frio. Na região da dobra, três regiões foram verificadas, a primeira na porção interna da dobra, a segunda no centro da dobra e a terceira na parte externa. O mesmo critério foi seguido para a análise de três regiões que não sofreram deformação a frio. A Figura 28 mostra as regiões definidas.

Figura 28 - Definição das regiões para análise metalográfica



Fonte: O autor.

5.4.2 Preparação da amostra

A primeira etapa da preparação da amostra foi cortá-la em uma parte menor para que se encaixasse melhor no porta-amostra do microscópio, assim como menciona Colpaert (2008) na seção 4.2. A condição da amostra após o corte é apresentada na Figura 29.

Figura 29 - Amostra para estudo metalográfico



Fonte: O autor.

As etapas posteriores consistem na preparação da superfície de análise através do lixamento, polimento e ataque químico. O lixamento foi realizado com auxílio de uma politriz onde coloca-se uma lixa adesiva sobre o disco giratório e realiza-se a operação de lixamento, conforme Figura 30.

Figura 30 - Politriz utilizada na preparação da amostra



Fonte: O autor.

As lixas utilizadas foram da Allied de carboneto de silício. A Figura 31 apresenta a lixa 120 e as lixas posteriores seguem a mesma especificação, porém alterando somente a granulometria do abrasivo.

Figura 31 - Lixa metalográfica 120 de carboneto de silício

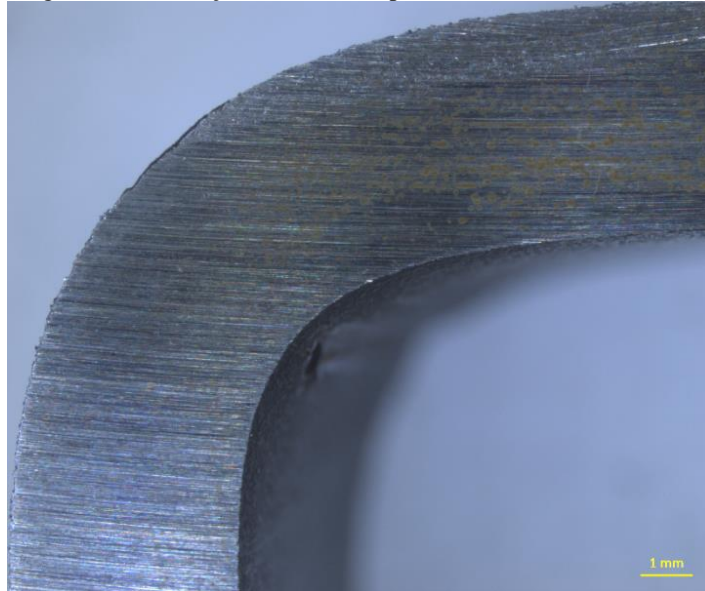


Fonte: O autor.

A primeira lixa utilizada foi a 120, aplicada nas superfícies inferior e superior da amostra para permitir planicidade entre as duas faces e facilitar a visualização no microscópio. As lixas posteriores foram aplicadas somente na superfície de interesse, invertendo a posição de lixamento em 90°, verificando a eliminação dos riscos e marcas da lixa anterior e seguem a ordem: 240, 300, 400, 600 e 800, conforme descrito por Colpaert (2008) na seção 4.2. A

condição da amostra após o lixamento com a lixa 120 é mostrada na Figura 32 com aproximação de 10 vezes.

Figura 32 - Condição da amostra após o lixamento com lixa 120



Fonte: O autor.

O polimento foi realizado na mesma politriz, porém, com um feltro adesivo e com a aplicação do abrasivo composto por alumina em suspensão, que pode ser verificado na imagem abaixo.

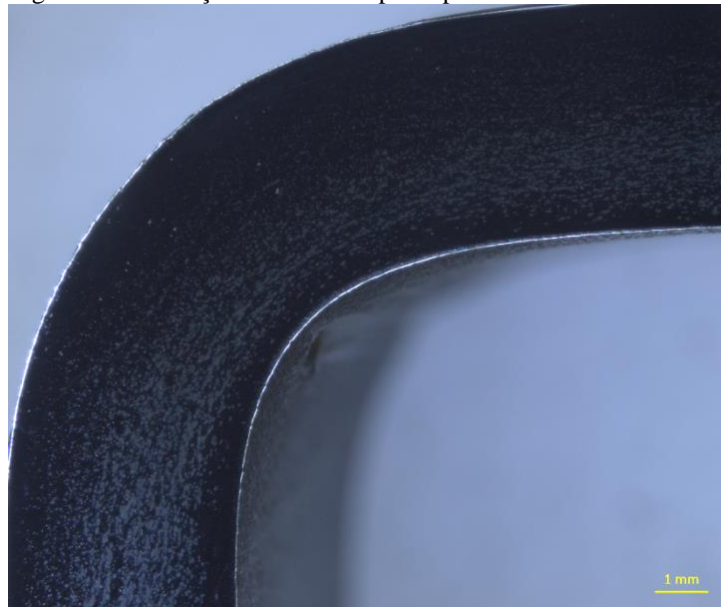
Figura 33 - Alumina em suspensão para polimento



Fonte: O autor.

Após o polimento a amostra ficou na condição apresentada na imagem abaixo com aproximação de 10 vezes, no qual pode-se verificar que não há riscos e marcas de lixamento.

Figura 34 - Condição da amostra após o polimento



Fonte: O autor.

O ataque químico foi realizado através do reagente químico Nital com concentração de 3%, ou seja, 3% de ácido nítrico dissolvido em etanol. A operação foi realizada mergulhando a superfície da amostra durante 10 segundos. A amostra passou por uma limpeza com álcool, algodão e aplicando jato de ar quente através de um secador de cabelos. A condição da amostra após o ataque químico é apresentada na Figura 35.

Figura 35 - Condição da amostra após o ataque com Nital



Fonte: O autor.

5.4.3 Exame da microestrutura

A análise metalográfica foi feita nas seis regiões indicadas na figura 28 com aproximações de 25, 50, 100, 200, 500 e 1000 vezes. As imagens foram capturadas através da utilização do microscópio Axio Scope.A1 com capacidade de aproximação até 1000 vezes. Para a obtenção das imagens, foi utilizado um software da ZEN. Os microscópios e o computador auxiliar estão representados na Figura 36.

Figura 36 - Microscópio e computador auxiliar para análise metalográfica



Fonte: O autor.

Um fator extremamente importante para a análise metalográfica é obter a planicidade entre a amostra e a base do microscópio, principalmente para análise com aproximação de 1000 vezes. Para obter a planicidade foi aplicada uma massa, representada na Figura 37, na superfície inferior da amostra para corrigir as imperfeições e submetida em um dispositivo para pressionar e distribuir a massa.

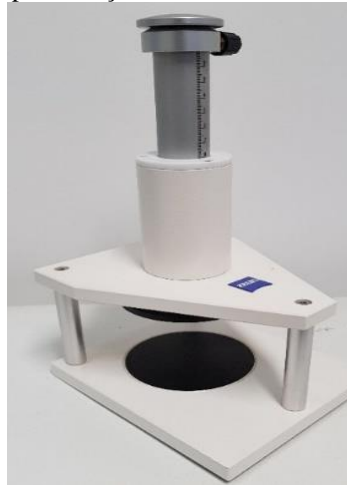
Figura 37 - Massa para planificar a amostra



Fonte: O autor.

O dispositivo utilizado para promover a planificação da amostra está representado na Figura 38.

Figura 38 - Dispositivo de planificação de amostra

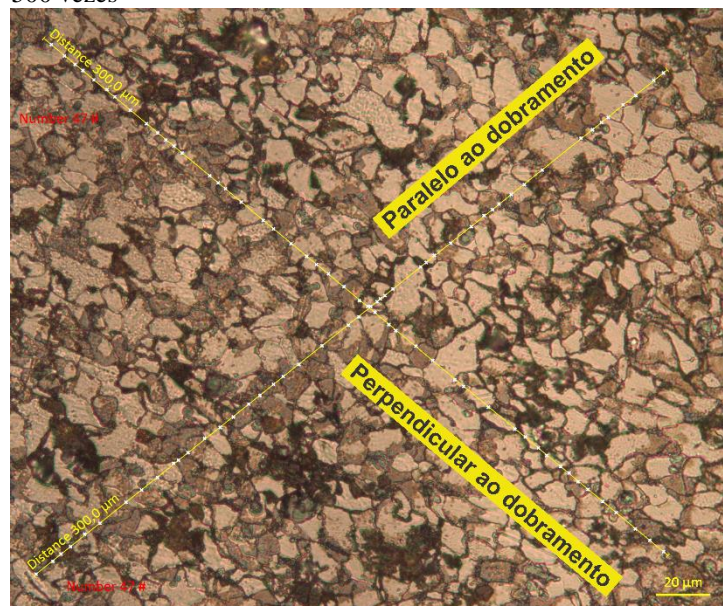


Fonte: O autor.

5.4.3.1 Obtenção do tamanho do grão

O método utilizado para determinar o tamanho do grão nas regiões indicadas na Figura 28 foi o procedimento da intersecção linear, já descrito na seção 4.1.1. Este método foi aplicado nas aproximações de 500 e 1000 vezes para cada região. Na aproximação de 500 vezes, após obter a imagem metalográfica através do software descrito acima, foi realizado o desenho de duas linhas diagonais, uma perpendicular ao dobramento e outra paralela, com comprimento de $300\mu\text{m}$ cada, conforme Figura 39.

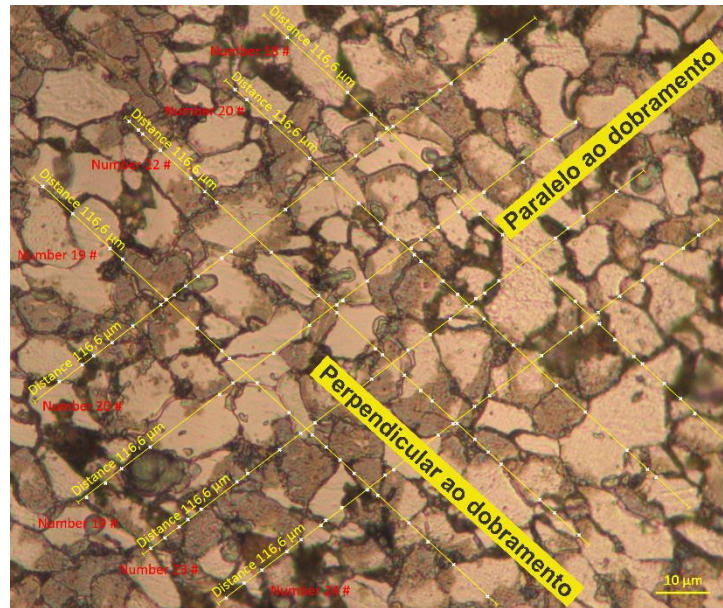
Figura 39 - Marcação das linhas de contagem para aproximação de 500 vezes



Fonte: O autor.

Para a aproximação de 1000 vezes, 8 linhas foram desenhadas, 4 em cada diagonal, com o comprimento de 116,6µm. Os comprimentos e as quantidades de linhas mencionadas foram escolhidos porque permitem um maior aproveitamento da imagem obtida e para intersecionarem um número adequado de contornos de grão, conforme descrito na seção 4.1.1.

Figura 40 - Marcação das linhas de contagem para aproximação de 1000 vezes



Fonte: O autor.

Dessa forma, \bar{l} representa o comprimento médio de intersecções lineares e G representa o tamanho do grão definido pela ASTM E112-12. A equação utilizada para calcular o tamanho do grão está representada abaixo.

$$G = -3,2877 - 6,6439 \log \bar{l} \quad (27)$$

O tamanho do grão foi calculado considerando tanto individualmente, quanto em conjunto, as intersecções paralelas e perpendiculares ao sentido de dobramento, como apresentado nas figuras 39 e 40. Assim, pode-se avaliar a influência do dobramento em ambas as direções do grão.

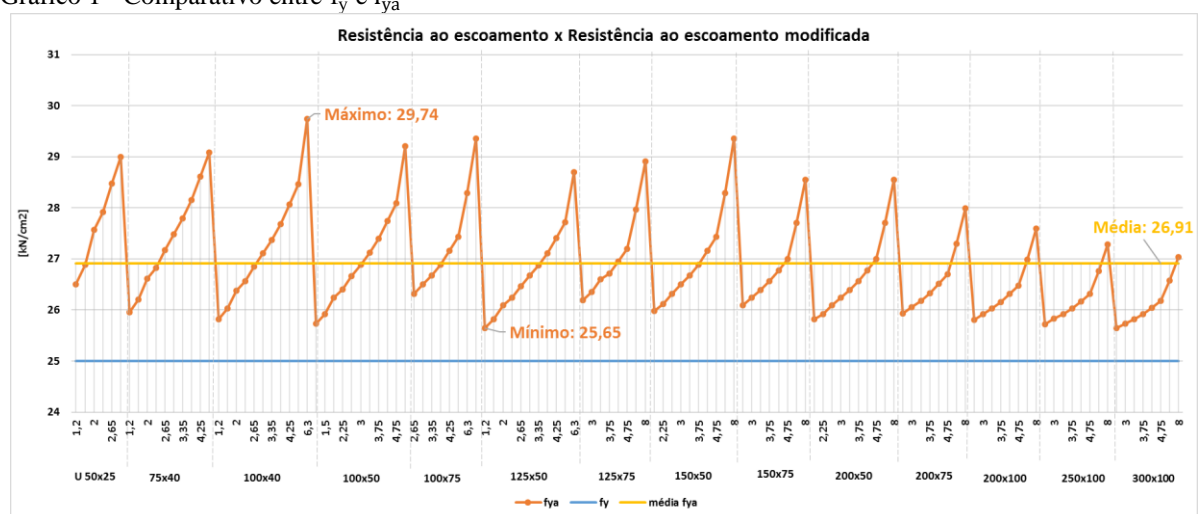
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após realizar o método de análise conforme descrito na seção 5, obteve-se os resultados mostrados a seguir. Primeiramente, será mostrado o efeito do trabalho a frio na tensão de escoamento do material, como descrito na seção 2.5 e calculado na seção 5.1. Logo em seguida serão apresentados os gráficos comparativos dos esforços resistentes de cálculo dos perfis submetidos a tração e compressão considerando o aumento da resistência ao escoamento. Além disso, serão apresentados os gráficos de tendência do comportamento dos perfis formados a frio quando submetidos a compressão considerando o comprimento. Por último, serão apresentados os resultados da análise metalográfica.

6.1 Aumento da resistência ao escoamento devido ao efeito do trabalho a frio

A influência do aumento da tensão de escoamento de um perfil devido ao efeito do trabalho a frio depende da relação entre a tensão última (f_u) e a tensão de escoamento (f_y), da relação entre o raio interno de dobra (r_i) e a espessura do perfil (t). Além disso, também depende da relação entre a área de dobra e a área total do perfil. O gráfico abaixo mostra a relação entre (f_y) e a tensão de escoamento modificada (f_{ya}) para todos os perfis U simples formados a frio padronizados pela NBR6355:2012.

Gráfico 1 - Comparativo entre f_y e f_{ya}

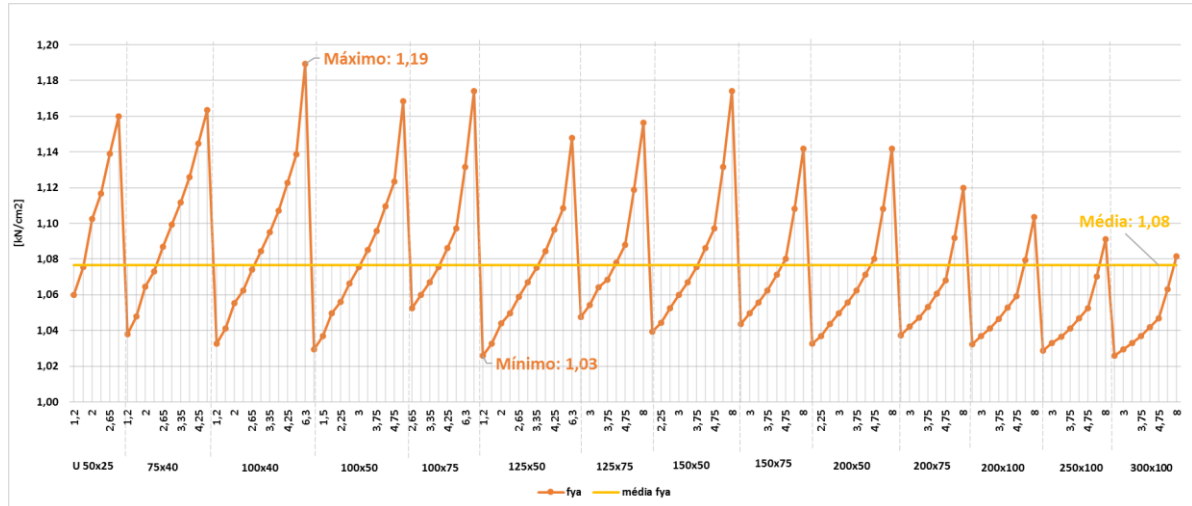


Fonte: O autor.

Sendo assim, quanto maior a espessura de cada grupo de perfil maior será o aumento da tensão de escoamento devido ao efeito do trabalho a frio. O perfil que apresenta o maior ganho

é o de 100 x 40 x 6,3, onde a resistência ao escoamento era de 25kN/cm² e passa a ser 29,74 25kN/cm², apresentando um aumento de 19%. O perfil que tem o menor aumento é U 125 x 50 x 1,2, que corresponde a 3%, conforme gráfico abaixo.

Gráfico 2 - Aumento da tensão de escoamento



Fonte: O autor.

Observa-se nos gráficos acima que a tensão de escoamento modificada cai drasticamente quando ocorre a mudança do grupo de perfil U simples. Isto acontece porque a transição de um grupo para o subsequente começa com um perfil de espessura pequena, que tem um ganho bem menor quando comparado com o perfil do mesmo grupo, porém com espessura maior. Em média os perfis tem aumento de 8% na tensão de escoamento.

6.2 Esforços resistentes de cálculo

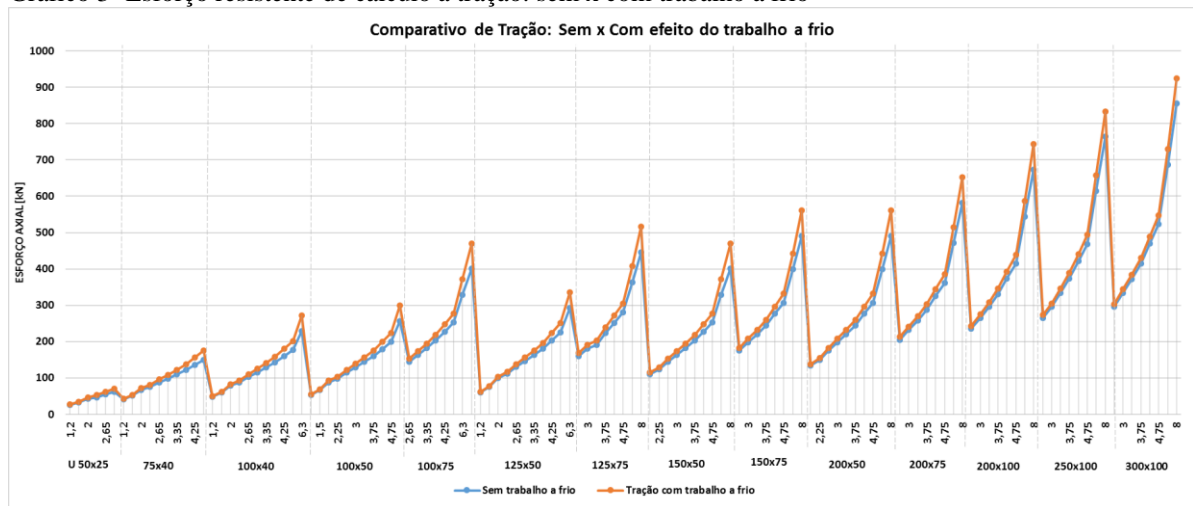
A seguir, serão apresentados os resultados do cálculo dos esforços resistentes para perfis U simples submetidos a tração e compressão. Além disso, será mostrado também, os esforços resistentes específicos de cálculos dos perfis, assim como uma média comparativa entre os esforços calculados através da tensão de escoamento do material virgem e considerando o aumento da tensão de escoamento devido ao trabalho a frio.

6.2.1 Esforço axial de tração

Como a tensão de escoamento tem um aumento influenciado pela espessura da chapa e área de dobra, o esforço resistente específico de cálculo de barras submetidas a tração (N_t , R_d)

também aumenta. Observando a equação 6, há uma relação diretamente proporcional entre f_y e $N_{t, Rd}$. O Gráfico 3 apresenta os resultados dos esforços resistentes de cálculo para todos os perfis, comparando a utilização da tensão de escoamento virgem do material com a tensão de escoamento aumentada.

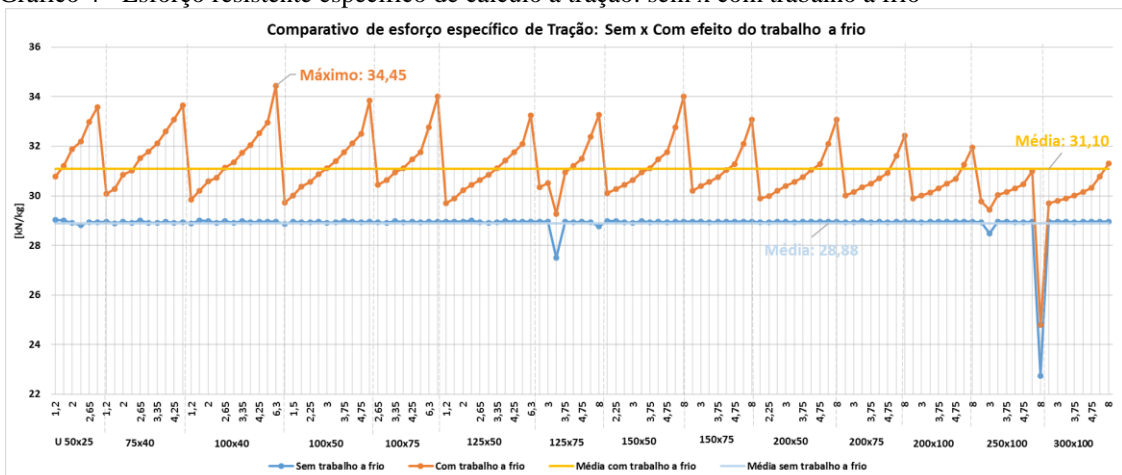
Gráfico 3 - Esforço resistente de cálculo a tração: sem x com trabalho a frio



Fonte: O autor.

Os esforços resistentes específicos de cálculo a tração também são diretamente proporcionais ao aumento da tensão de escoamento, como mostra o Gráfico 4.

Gráfico 4 - Esforço resistente específico de cálculo a tração: sem x com trabalho a frio



Fonte: O autor.

A média de esforços resistentes específicos foi de 31,10 kN/kg, representando um aumento de cerca de 8% em relação à média dos esforços resistentes específicos de cálculo sem considerar o efeito do trabalho a frio (28,88 kN/kg). Esse aumento foi o mesmo encontrado na

comparação da tensão de escoamento, evidenciando que o esforço de tração é diretamente proporcional à tensão de escoamento.

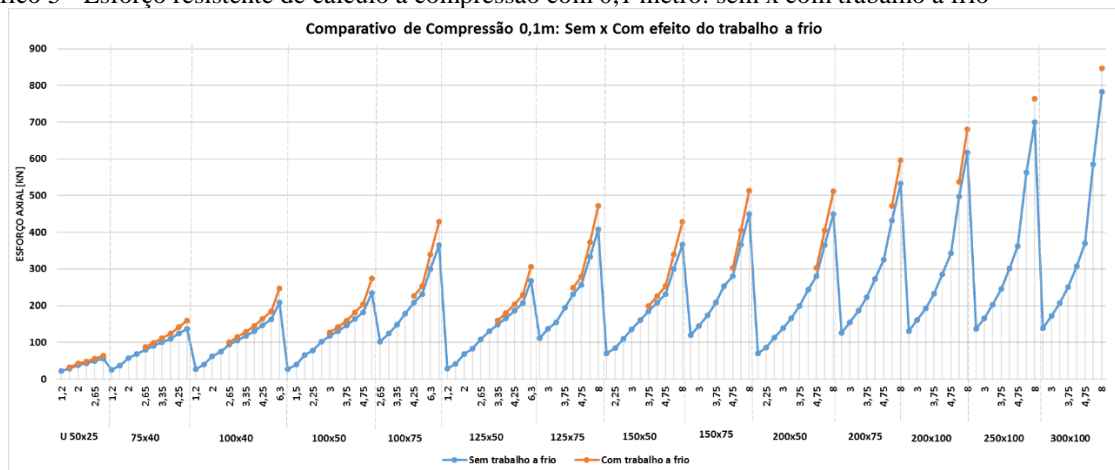
O perfil 100 x 40 x 6,3 também apresentou o maior aproveitamento em relação ao esforço resistente de cálculo a tração. Obtendo a maior relação (34,45 kN/kg) entre o esforço suportado e o peso do perfil, isto é, representa o melhor custo benefício dentre todos perfis U simples submetidos a tração e um aumento de 19% quando utilizada a tensão de escoamento virgem do material.

6.2.2 Esforço axial de compressão

O esforço axial resistente de cálculo a compressão não depende somente da área do perfil e da tensão de escoamento do material, como nos esforços de tração. Uma variável extremamente importante para compreender o comportamento de uma barra submetida a compressão é o seu comprimento. Por isso, foi definido na seção 5.2.2 os comprimentos a serem considerados nesta análise.

O gráfico abaixo apresenta os valores do esforço resistente de cálculo para o comprimento de 0,1 metro. Observa-se que a curva que representa o esforço considerando o trabalho a frio possui algumas lacunas. Isto significa que os perfis contidos naquele espaço não atendem ao requisito descrito na seção 5.1 para utilização do aumento da tensão de escoamento. Trata-se da limitação do índice de esbeltez reduzido da seção completa (λ_p), que deve ser menor ou igual a 0,673, no qual a área efetiva da seção transversal da barra (A_{ef}) deve ser igual a área bruta da seção transversal da barra (A). Nesse caso em específico 54 dos 125 perfis atendem ao requisito.

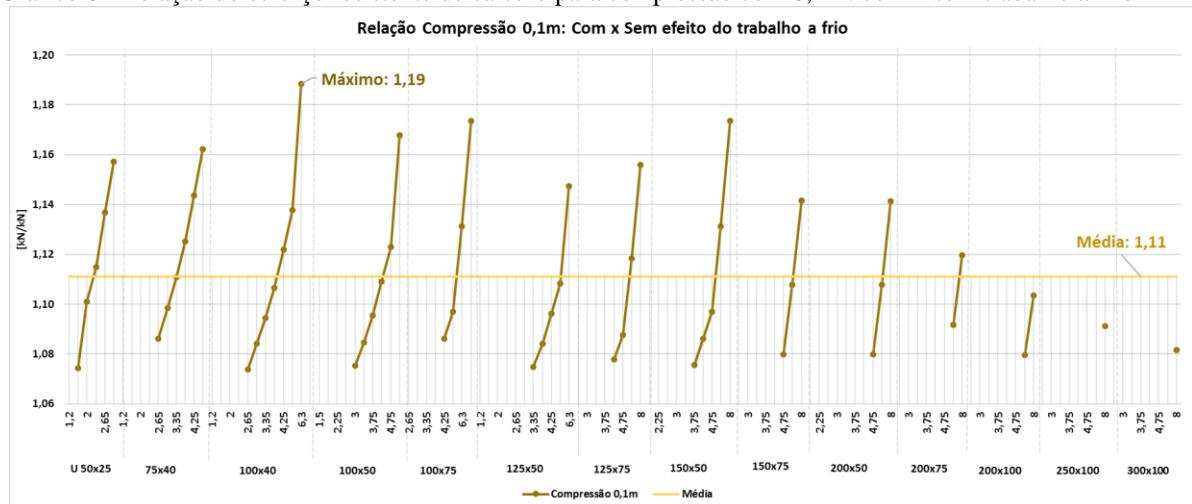
Gráfico 5 - Esforço resistente de cálculo a compressão com 0,1 metro: sem x com trabalho a frio



Fonte: O autor.

Para ilustrar a relação de aumento do esforço resistente de cálculo a compressão ao considerar o efeito do trabalho a frio, o gráfico abaixo apresenta as informações.

Gráfico 6 - Relação do esforço resistente de cálculo para compressão com 0,1m: com x sem trabalho a frio

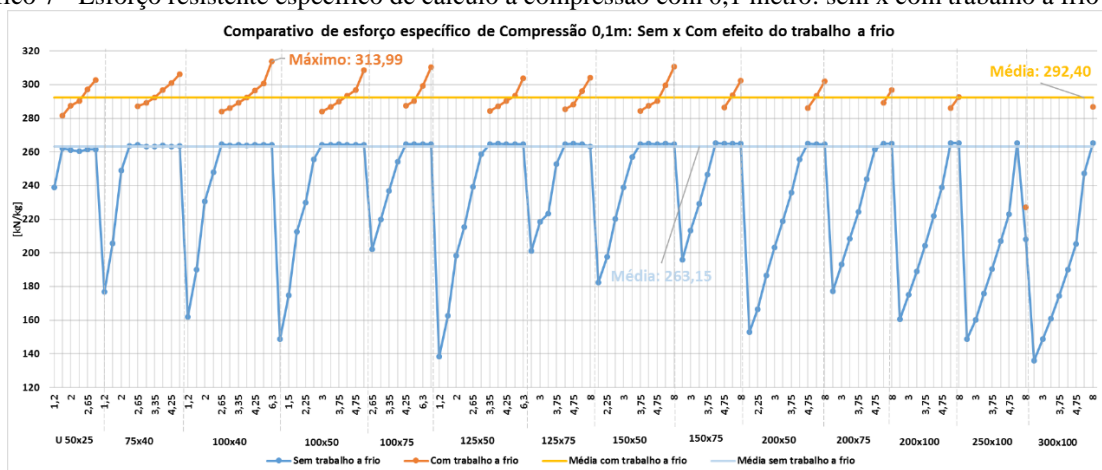


Fonte: O autor.

Novamente, o perfil que demonstra o maior aumento no esforço resistente é o U 100 x 40 x 6,3. A média de aumento esforço resistente específico de cálculo é de 11%, conforme o gráfico acima.

O esforço resistente específico de cálculo a compressão de barras com comprimento de 0,1 metro é apresentado no gráfico abaixo. Observa-se que, para a compressão com esse comprimento, a performance das barras aumenta gradativamente na medida em que sua espessura aumenta. O perfil que apresenta a melhor performance é o U 100 x 40 x 6,3 com um valor de 313,99 kN/kg.

Gráfico 7 - Esforço resistente específico de cálculo a compressão com 0,1 metro: sem x com trabalho a frio



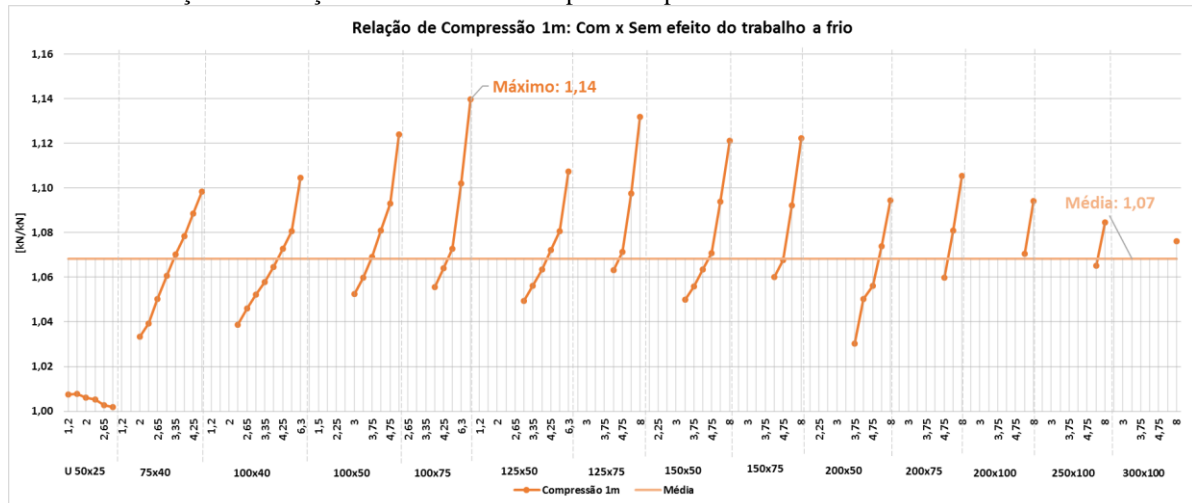
Fonte: O autor.

A média do esforço específico de cálculo para os perfis que atendem os requisitos da norma, com efeito do trabalho a frio, é 292,4kN/kg. Já sem considerar o efeito do trabalho a frio esse valor é 263,15 kN/kg, para os mesmos perfis. Isso representa um aumento de 16% no esforço específico resistente de cálculo.

Considerando o comprimento de 1 metro, 66 perfis atendem a limitação da área efetiva e representa um número maior que os 54 perfis que atendem a este requisito para 0,1 metro de comprimento. Com 1,5 metros de comprimento, 75 perfis atendem ao requisito. Com 2 metros, esse número passa a ser 84, 78 para 2,5 metros, 58 para 3 metros, 41 para 3,5 metros e 45 para 4 metros. Com isso observa-se que a quantidade de perfis que atendem ao requisito aumenta com na medida em que o comprimento aumenta até atingir o comprimento de 2 metros e diminui com comprimentos maiores que 2 metros.

O gráfico abaixo mostra os resultados do aumento do esforço resistente para cada perfil com 1 metro de comprimento. Nota-se que, nesse caso o perfil que tem melhor performance é o U 100 x 75 x 8, apresentando um aumento de 14%. Isso acontece porque, com o aumento do comprimento a flambagem se torna mais crítica e irá acontecer no eixo de menor inércia do perfil. Quanto mais quadrado o perfil, melhor será seu aproveitamento porque ele não terá um eixo com uma resistência muito menor em relação ao outro.

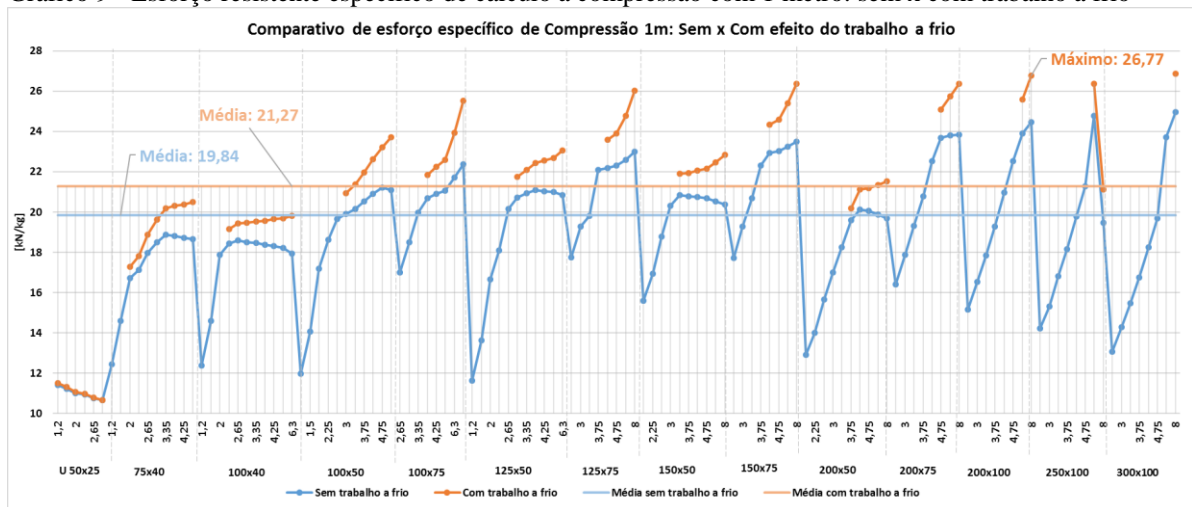
Gráfico 8 - Relação do esforço resistente de cálculo para compressão com 1m: com x sem trabalho a frio



Fonte: O autor.

Em relação ao esforço resistente específico há um acréscimo de cerca de 7% na média dos perfis que atendem aos requisitos mencionados no início desta seção. Observa-se que há um decréscimo desse valor se compararmos com o comprimento de 0,1 metro no qual é de 16%. O perfil que apresenta a melhor economia é o U 200 x 100 x 8 com 26,77 kN/kg.

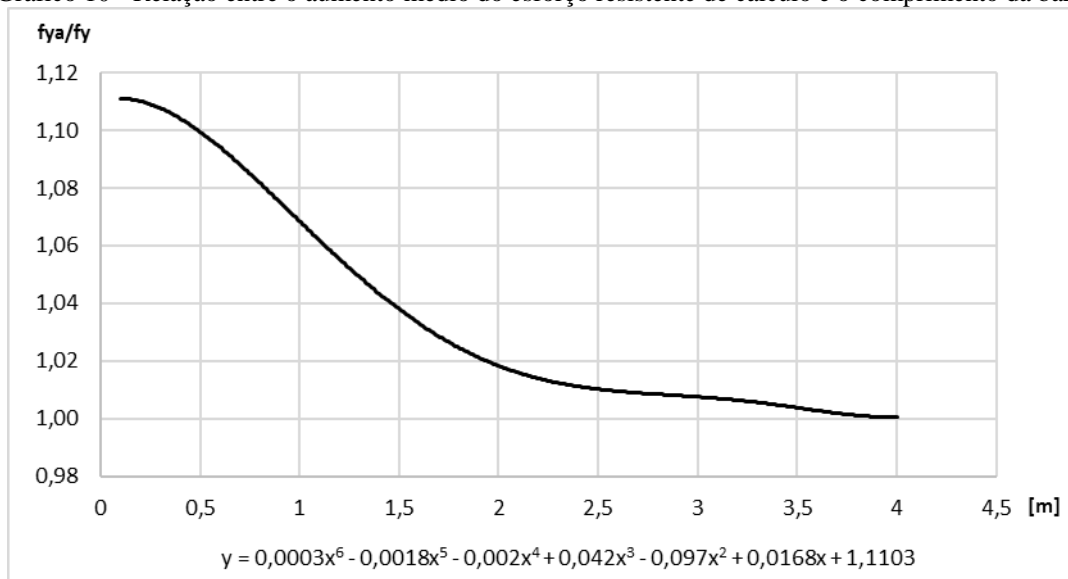
Gráfico 9 - Esforço resistente específico de cálculo a compressão com 1 metro: sem x com trabalho a frio



Fonte: O autor.

Sendo assim, pode-se representar graficamente a média do aumento do esforço resistente de cálculo para os comprimentos considerados neste trabalho e já mencionados em 5.2.2, conforme o gráfico abaixo.

Gráfico 10 - Relação entre o aumento médio do esforço resistente de cálculo e o comprimento da barra



Fonte: O autor.

Através do gráfico acima, pode-se perceber que na medida em que o comprimento aumenta, o ganho de resistência devido ao trabalho a frio diminui. A equação de tendência que descreve matematicamente o comportamento da média dos perfis também está representada no gráfico. Foi escolhida uma equação polinomial de grau 6 porque permite uma aproximação de 99,9%. Isto significa que, dentro do intervalo de 0,1 a 4 metros, a exatidão do valor encontrado

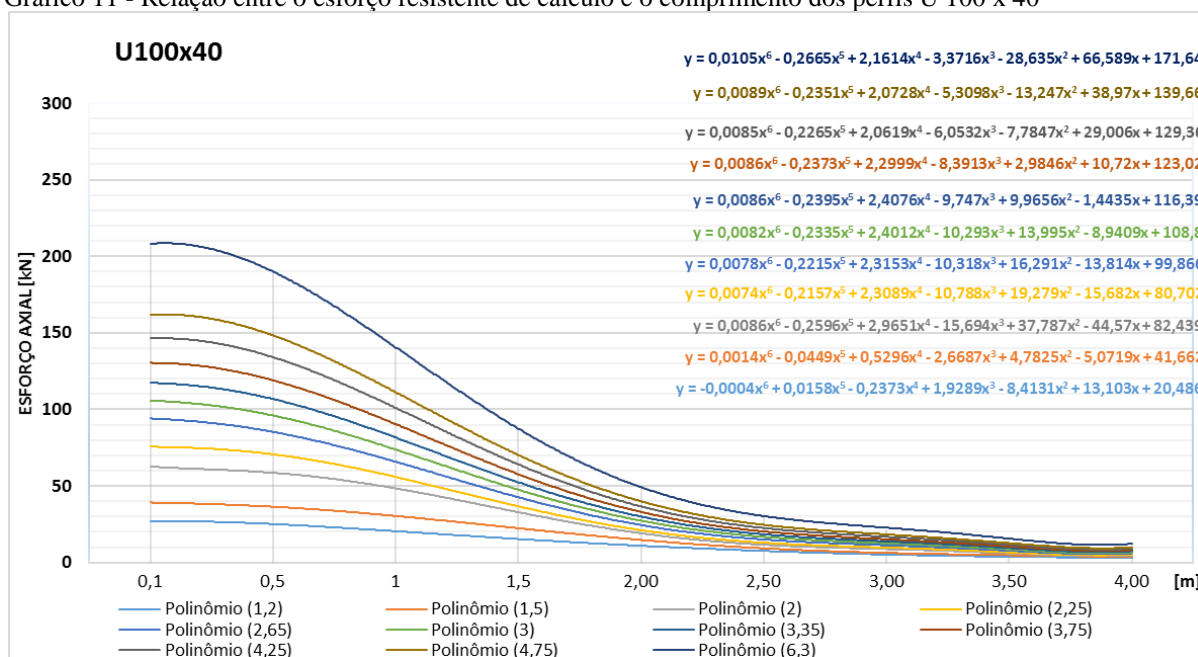
através da equação, onde a variável x é o comprimento e y é o aumento do esforço resistente, é de 99,9%.

Para que se tenha um entendimento mais detalhado do comportamento de um perfil em específico, foi tomado como referência os perfis da série U 100 x 40 – porque foi o grupo de perfil que teve maior aumento na tensão de escoamento – considerando todas as espessuras, que totalizam 11 perfis. O Gráfico 11 representa as linhas de tendência de comportamento desses perfis submetidos a compressão considerando comprimentos de 0,1 até 4 metros. As diferentes cores de curvas representam as espessuras dos perfis que também estão relacionadas com as equações de tendência mostradas do gráfico. Todas as equações possuem um grau de aproximação maior que 99,9%.

A representação gráfica não leva em consideração as limitações e requisitos definidos pela NBR14762:2010, tais como a limitação de esbeltez para barras comprimidas e a limitação da área efetiva para utilização do aumento da tensão de escoamento devido ao efeito do trabalho a frio. Estes requisitos não foram considerados porque alguns perfis não atendem a essas limitações dependendo do comprimento da barra e não seria possível obter as equações de tendência se não houvesse todos os valores de 0,1 até 4 metros.

Dessa forma, as equações de tendência apresentadas abaixo podem ser utilizadas para obter o esforço resistente de cálculo, mas não significa que o perfil escolhido atende aos requisitos mencionados anteriormente. Para isso, deve-se realizar o cálculo da esbeltez e da área efetiva do perfil, já mencionados nas seções 3.2 e 5.2.2.

Gráfico 11 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 100 x 40

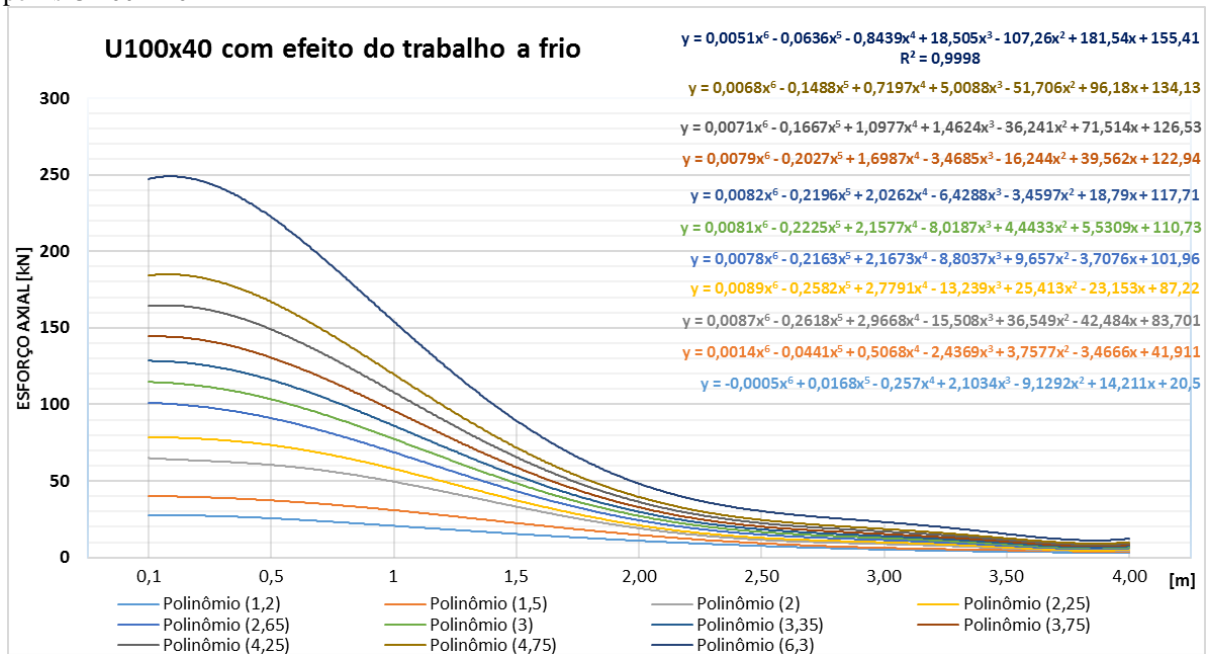


Fonte: O autor.

Considerando o efeito do trabalho a frio no esforço resistente de cálculo, percebe-se que há um aumento da amplitude das curvas, principalmente com comprimentos inferiores a 2 metros. Observando o perfil U 100 x 40 x 6,3, representado pela equação e curva na cor azul escuro, a primeira curva e a primeira equação, nos gráficos 11 e 12, a curva se inicia com pouco mais de 200kN no Gráfico 11, já no Gráfico 12 ela já se inicia próximo a 250 kN.

Analisando o mesmo perfil, porém, agora observando quando o comprimento é de 2 metros, ambos os gráficos mostram que as curvas estão próximas a 50kN. Este dado corrobora com as informações apresentadas no Gráfico 10, e mostra que acima de 2 metros de comprimento, o aumento do esforço resistente de cálculo é pequeno, menor que 2%. As representações gráficas do restante dos perfis podem ser verificadas no Apêndice C.

Gráfico 12 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 100 x 40

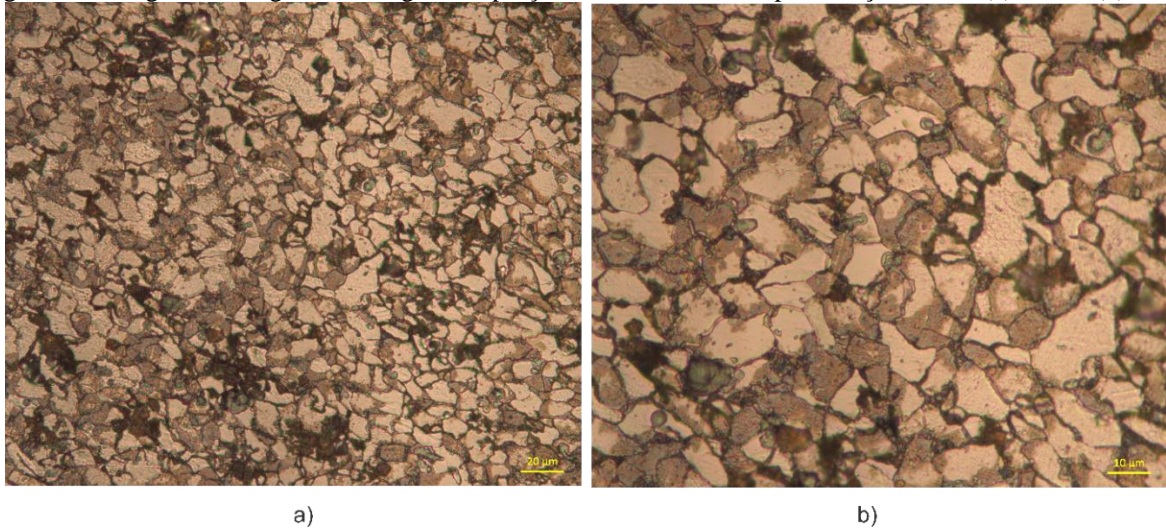


Fonte: O autor.

6.3 Análise metalográfica

A análise metalográfica teve como objetivo mensurar o tamanho do grão de um perfil dobrado feito de chapa de aço carbono CST COR 400, através das imagens obtidas pelo do microscópio. As regiões de foco são as regiões 1 e 3, de acordo com a Figura 28, que representam áreas sob grande influência da deformação plástica a frio. A Figura 41 mostra a imagem obtida com aproximação de 500 vezes (a) e 1000 vezes (b) da região 1, que representa a porção interior da dobra.

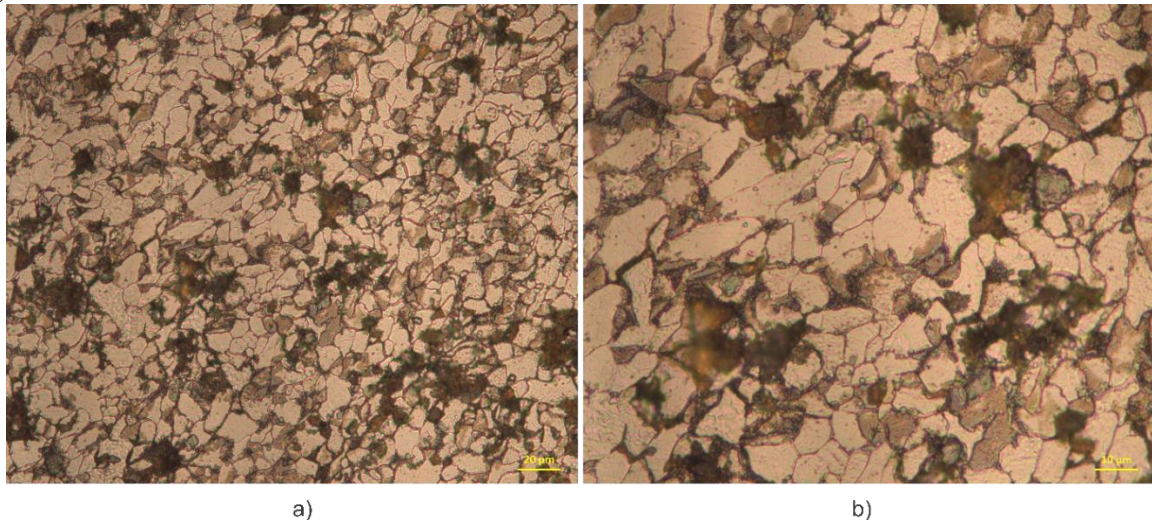
Figura 41 - Imagem metalográfica da região 1 – porção interna da dobra - aproximação de 500 (a) e 1000 (b) vezes



Fonte: O autor.

A região da metade da espessura, conforme Figura 42, apresenta grãos mais bem distribuídos em relação a região 1 no qual há uma distribuição dos grãos segundo uma orientação específica e pode-se perceber que, na região 1, os grãos formam linhas diagonais que saem do vértice esquerdo superior até a região inferior direita. Este fato é explicado porque na porção interna da dobra os grãos são comprimidos na direção perpendicular ao dobramento.

Figura 42 - Imagem metalográfica da região 2 – região da metade da espessura - aproximação de 500 (a) e 1000 (b) vezes

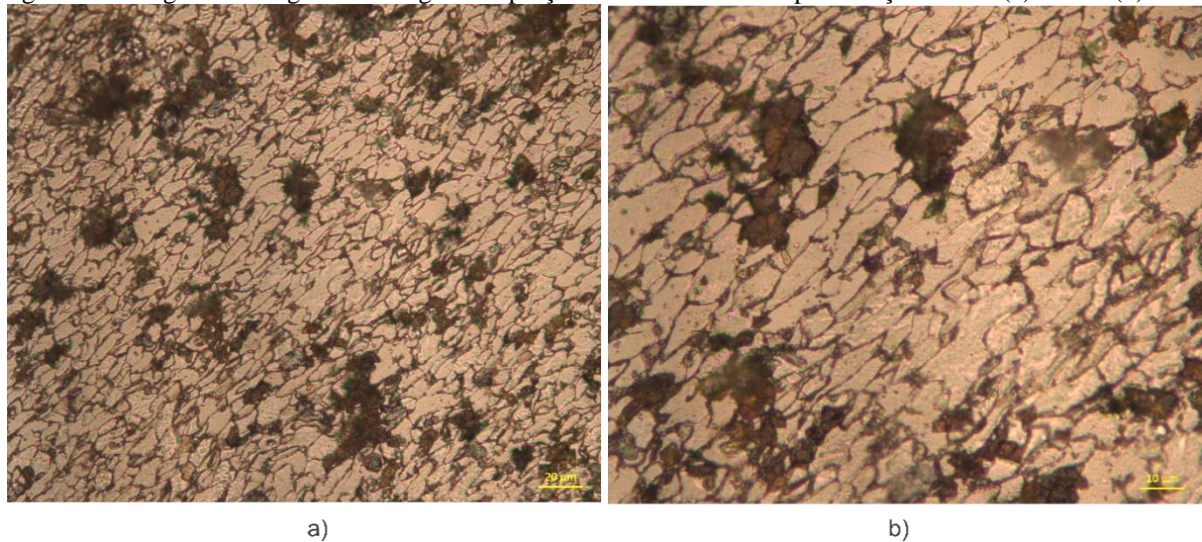


Fonte: O autor

A Figura 43 apresenta as imagens obtidas da região 3, porção externa da dobra, com as mesmas aproximações das regiões 1 e 2. Observa-se que os grãos tiveram um alongamento na direção paralela ao da dobra. Isto significa que, o processo de dobramento traciona as fibras ou

os grãos da porção externa da chapa. Imagens complementares do ensaio de metalografia podem ser consultadas no Apêndice D.

Figura 43 - Imagem metalográfica da região 3 – porção externa da dobra - aproximação de 500 (a) e 1000 (b) vezes



Fonte: O autor.

Através das imagens obtidas anteriormente foi realizado o procedimento para obtenção do tamanho do grão para as seis regiões definidas neste trabalho. A tabela abaixo mostra o número de interseções identificados nas imagens metalográficas e o comprimento linear médio de interseções para as aproximações de 500 e 1000 vezes. O comprimento das linhas de marcação pode ser consultado na seção 5.4.3.1.

Tabela 1 - Contagem de interseções das linhas perpendiculares e paralelas ao dobramento

Região	Aproximação	Quantidade de interseções								Comprimento linear médio de interseções [μm]		
		Perpendicular ao dobramento				Paralelo ao dobramento				Geral	Perpend.	Paral.
		1	2	3	4	5	6	7	8			
Região 1	500x	47	-	-	-	47	-	-	-	6,38	6,38	6,38
	1000x	19	22	20	18	20	19	23	24	5,65	5,90	5,42
Região 2	500x	58	-	-	-	37	-	-	-	6,32	5,17	8,11
	1000x	25	19	25	20	15	15	17	23	5,87	5,24	6,66
Região 3	500x	69	-	-	-	38	-	-	-	5,61	4,35	7,89
	1000x	29	28	29	25	16	15	17	14	5,39	4,20	7,52
Região 4	500x	41	-	-	-	40	-	-	-	7,41	7,32	7,50
	1000x	13	19	21	21	19	20	16	20	6,26	6,30	6,22
Região 5	500x	54	-	-	-	46	-	-	-	6,00	5,56	6,52
	1000x	21	21	24	23	23	18	17	22	5,52	5,24	5,83
Região 6	500x	59	-	-	-	54	-	-	-	5,31	5,08	5,56
	1000x	24	21	25	27	26	28	25	19	4,78	4,81	4,76

Fonte: O autor.

Os números de 1 a 8 do cabeçalho da Tabela 1 representam a identificação das linhas de marcação desenhadas nas imagens metalográficas para obter a quantidade de intercepções. As células sem número, preenchidas com um traço, significam que para a aproximação de 500 vezes apenas 2 linhas, uma em cada diagonal, foram desenhadas para a contagem das intercepções, conforme descrito na seção 5.4.3.1. O tamanho de grão é calculado utilizando a Equação 27 através do comprimento linear médio de intercepções, obtido do quociente entre a soma dos comprimentos das linhas traçadas e o número de intercepções dessas linhas nos contornos de grão.

O tamanho de grão obtido foi utilizado para encontrar os valores de área e diâmetro médio dos grãos nas regiões analisadas, realizando interpolação linear dos valores da Figura 19. Esses valores foram considerados isoladamente para as linhas paralelas e perpendiculares ao sentido de dobramento, como também uma análise geral das imagens obtidas, calculando a média dos valores obtidos em ambos os sentidos mencionado anteriormente. Esta última análise é a mais adequada para obter o tamanho de grão, conforme orientação da ASTM E112-12. Para simplificar a análise foi realizada a média dos valores obtidos das aproximações de 500 e 1000 vezes para cada região. A Tabela 2 apresenta os valores encontrados da área média e diâmetro médio dos grãos, interpolados da Figura 19.

Tabela 2 - Área média e diâmetro médio do grão geral, paralelo e perpendicular à dobra nas seis regiões da amostra

Região	Área média [μm^2]			Diâmetro médio [μm]		
	Geral	Perpendicular	Paralelo	Geral	Perpendicular	Paralelo
Região 1	46,45	48,09	44,88	6,79	6,92	6,65
Região 2	47,29	32,42	65,36	6,87	5,82	8,13
Região 3	38,68	19,64	64,20	6,20	4,60	8,35
Região 4	60,03	59,46	60,61	7,68	7,65	7,71
Região 5	42,26	36,22	48,76	6,49	6,06	6,96
Região 6	32,59	31,09	34,17	5,68	5,55	5,81

Fonte: O autor.

Observando o quadro acima, identifica-se que, quando se compara a região 1 com a região 3, a área média geral e o diâmetro médio geral são menores na região 3. Porém quando se analisa isoladamente as direções paralela e perpendicular dos grãos, a região 3 apresenta valores maiores na direção paralela e valores menores na perpendicular.

Para obter melhor visualização das alterações do grão, a Tabela 3 apresenta o comparativo entre os grãos antes da conformação a frio (regiões 4, 5 e 6), ou com características

sem ser submetidos ao trabalho a frio, com os grãos que foram submetidos ao trabalho a frio (regiões 1, 2 e 3). Sendo assim, são comparadas as regiões 1 e 4, regiões 2 e 5 e, as regiões 3 e 6, através do quociente dos valores da Tabela 2 para cada região.

Tabela 3 - Relação entre as regiões da amostra através da área média e diâmetro médio do grão

Comparativo de Regiões	Área média [μm^2]			Diâmetro médio		
	Geral	Perpendicular	Paralelo	Geral	Perpendicular	Paralelo
Regiões 1 e 4	0,77	0,81	0,74	0,88	0,90	0,86
Regiões 2 e 5	1,12	0,90	1,34	1,06	0,96	1,17
Regiões 3 e 6	1,19	0,63	1,88	1,09	0,83	1,44

Fonte: O autor.

Observando os dados acima, identifica-se que os grãos da porção interna da chapa obtiveram uma redução de área geral média em 23% e diâmetro geral médio em 12%, porque os valores são menores que 1. Isoladamente, as direções perpendicular e paralela também obtiveram redução da área média e do diâmetro médio. Na porção mediana da chapa, regiões 2 e 5 houve um aumento de 12% da área geral média e 6% do diâmetro geral médio. Entretanto, analisando a direção perpendicular, observa-se uma redução de 10% na área média e 4% no diâmetro médio, enquanto na direção paralela ao dobramento ocorre um aumento desses valores.

O mesmo pode ser observado para a porção externa da chapa, regiões 3 e 6, no qual, analisando no contexto geral ocorre um aumento de 19% da área média e 9% do diâmetro médio. Além disso, como observado na comparação das regiões 2 e 5, na direção perpendicular observa-se a redução da área e do diâmetro médio, enquanto na direção paralela ocorre um aumento desses valores. Neste caso, entretanto, o aumento é consideravelmente maior. Observa-se o aumento de 88% da área média e 44% no diâmetro médio, analisando a direção paralela ao dobramento.

Sendo assim, as alterações ocorridas no diâmetro médio podem ser analisadas como o grau de alongamento do grão quando submetido a deformação plástica. O maior alongamento observado foi na parte tracionada da dobra, apresentando 44% de aumento na direção paralela ao dobramento.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As propriedades de um material são alteradas pelo trabalho a frio. Como o material na região das dobras de uma seção é submetido a uma deformação plástica, as propriedades mecânicas são diferentes em várias partes da seção transversal. Quando o processo de formação dos perfis é descontínuo, isto é, através de prensas dobradeiras, o aumento das resistências à tração e ao escoamento se concentra na região das dobras. Já no processo contínuo, laminação a frio com rolos, esse acréscimo atinge outras regiões do perfil, porque toda parte do perfil entre os roletes está sob tensão na linha de perfilação. As mudanças nas propriedades mecânicas devido ao trabalho a frio são causadas principalmente pelo encruamento e pelo envelhecimento que promovem uma alteração na curva característica de tensão-deformação do aço.

A plasticidade e a capacidade geral para se deformar – denominada como ductilidade – diminuem. Dentre as várias alterações, as que têm maior destaque são as que ocorrem nas propriedades mecânicas, como a tensão de escoamento do aço. O trabalho a frio pode proporcionar significativo aumento na resistência ao escoamento na tração e na compressão.

Os efeitos do trabalho a frio nas propriedades mecânicas na região das dobras geralmente dependem de diversos fatores e os mais importantes são as relações f_u/f_y e r_i/t . Quanto maior a relação f_u/f_y , maior será o potencial de um aço para sofrer o encruamento. Pequenas relações entre o raio interno de dobra e espessura (r_i/t) correspondem a um grande grau de trabalho a frio em uma dobra e, portanto, para um dado material, quanto menor essa relação maior o aumento na tensão de escoamento. Além disso, a quantidade de dobras de um perfil também influencia na determinação da resistência ao escoamento.

O aumento da tensão de escoamento devido ao trabalho a frio pode ser aplicado para os perfis que são submetidos aos esforços de tração, compressão centrada, flexão simples e composta e barras com painel conectado à mesa tracionada. Porém existem algumas restrições para aplicação deste recurso normativo que vão desde o ângulo de dobramento, relação entre espessura e raio interno de dobra e relação entre tensão de escoamento e tensão última. Em barras submetidas a compressão existe mais uma restrição, que consiste na limitação da área efetiva da seção transversal.

Assim, nem todos os perfis submetidos a compressão podem ser contemplados com o aumento da tensão de escoamento considerando comprimentos de 0,1 a 4 metros porque a NBR14762:2010 impõe requisitos para utilizar o aumento da tensão de escoamento devido ao trabalho a frio e limitação da esbelteza. Considerando o comprimento de 0,1 metro, 54 perfis

atendem a limitação da área efetiva e limitação de esbeltez, representando um número menor que os 66 perfis que atendem a este requisito para 1 metro de comprimento. Com 1,5 metros de comprimento 75 perfis atendem ao requisito. Com 2 metros esse número passa a ser 84, 78 para 2,5 metros, 58 para 3 metros, 41 para 3,5 metros e 45 para 4 metros. Com isso observa-se que a quantidade de perfis que atendem ao requisito aumenta com na medida em que o comprimento aumenta até atingir o comprimento de 2 metros e diminui com comprimentos maiores que 2 metros.

Em média, os perfis U simples possuem um aumento de 8% na tensão de escoamento. O perfil com o maior ganho é o de 100 x 40 x 6,3, apresentando um aumento de 19%. O perfil que tem o menor aumento é U 125 x 50 x 1,2, que corresponde a 3%. Quanto maior a espessura de cada grupo de perfil maior será o aumento da tensão de escoamento devido ao efeito do trabalho a frio.

O esforço resistente de cálculo a tração para perfis U simples formados a frio é diretamente proporcional ao aumento obtido na tensão de escoamento. Dessa forma, a média de aumento do esforço resistente de cálculo a tração também é de 8%. O perfil com o maior ganho é o de 100 x 40 x 6,3, apresentando também um aumento de 19%. O perfil que tem o menor aumento é U 125 x 50 x 1,2, que corresponde a 3%. O perfil 100 x 40 x 6,3 também apresentou o maior aproveitamento em relação ao esforço resistente de cálculo a tração e representa o melhor custo benefício dentre todos perfis U simples submetidos a tração.

O comportamento do perfil quando submetido ao esforço de compressão é influenciado pelo comprimento da barra. Quanto menor o comprimento, maior será o aumento do esforço resistente de cálculo a compressão devido ao efeito do trabalho a frio. Em média, com o comprimento de 0,1 metro, o aumento do esforço resistente de cálculo a compressão é de 11%. Quando se considera 1 metro, esse valor cai para 7%. Com 2 metros, a média é de 2% e com 3,5 metros os perfis U simples formados a frio, em média, não apresentam aumento do esforço resistente de cálculo.

Esses dados têm uma relação diretamente proporcional com a espessura do perfil, porém um fator importante é o momento de inércia do perfil porque, os perfis que têm melhor desempenho com comprimentos maiores são os que possuem abas maiores. Isto quer dizer que quanto maior a largura das abas do perfil mais estável ele será ao esforço de compressão.

Através da análise metalográfica, observou-se que ocorre uma deformação plástica importante dos grãos do aço, principalmente na região externa da dobra. Este resultado corrobora com as explicações dos autores sobre o encruamento e o envelhecimento do material quando submetido a um trabalho a frio.

O método de determinação da área média e do diâmetro médio do grão em diferentes regiões de uma peça dobrada aponta para uma diferença significativa ao analisar essas regiões. Na região comprimida da dobra, observa-se uma diminuição da área e o diâmetro médio do grão nas direções paralela e perpendicular ao dobramento. Por outro lado, na parte tracionada da dobra, observa-se a redução da área e do diâmetro na direção perpendicular ao dobramento, enquanto na direção paralela ocorreu um aumento desses valores, mostrando que os grãos se alongaram. O maior alongamento observado foi de 44% de aumento na direção paralela ao dobramento. Sendo assim, considerando as características da amostra e os métodos utilizados, o dobramento promove alterações importantes na estrutura micrográfica do material que devem ser consideradas e estudadas mais intensamente. O que é importante destacar, é que a análise feita considerou apenas uma amostra de perfil dobrado.

Diante do que foi exposto, de fato, o trabalho a frio promove melhorias consideráveis na performance dos perfis U simples. Dependendo do tipo de esforço no qual a barra é submetida, seu comportamento será diferente conforme as informações apresentadas no decorrer deste trabalho. Dessa forma, o aumento da tensão de escoamento devido ao efeito do trabalho a frio é um recurso normativo importante para ser utilizado no intuito de otimizar o dimensionamento de estruturas compostas por perfis formados a frio.

Para trabalhos futuros, diversas áreas podem ser exploradas com as informações e resultados obtidos neste trabalho. Esta mesma análise pode ser feita considerando, agora, o esforço de flexão simples e composta, para entender a influência do trabalho a frio na performance dos perfis U simples. Além disso, perfis U enrijecidos ou outros tipos de perfis formados a frio, podem ser objetos de uma análise similar a esta.

Outros métodos de obtenção do tamanho de grão podem ser estudados e avaliados para comparar com os resultados obtidos pelo método das intersecções lineares. Uma quantidade maior de amostras pode ser submetida a ensaios metalográficos considerando diferentes materiais e diferentes ângulos de dobra. Existe também a possibilidade de comparar os benefícios que o trabalho a frio promove nos perfis formados a frio e os benefícios que a conformação a quente promove em perfis laminados a quente e verificar a performance de ambos quando submetidos a determinadas solicitações de trabalho.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **S100-16**: North American specification for the design of cold-formed steel structural members. Washington: AISI, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E112-12: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro: ABNT, 2010 jul. 53 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6355**: Perfis estruturais de aço formados a frio: Padronização. Rio de Janeiro: ABNT, 2012 ago. 37 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008 ago. 237 p.
- BAPTISTA, A. **Verificação de Segurança de Perfis de Aço Enformado a Frio com Secção em C**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas e Geotecnia) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.
- BRITVEC, S.; CHAJES, A.; KARREN, K.; URIBE, J.; G. WINTER. **Effects of cold work in cold-formed steel structural members**. New York: Cornell University, 1970.
- CHICAGO METAL ROLLED PRODUCTS. **Stress, Strain Curve for Steel in the Rolling Process**. Disponível em: < <https://www.cmrp.com/contact-us> > Acesso em: 12 de julho de 2018.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4 ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- CORTEZ, L. Uso das estruturas de aço no Brasil. **Cadernos de graduação**, Alagoas, v. 4, n. 2, p. 217-228, nov. 2017.
- HIBBELER, R. **Mechanics of materials**. 8.ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2011. 862p.
- KARREN, K.; WINTER, G. **Effects of cold-forming on light-gage steel members**. Center for Cold-Formed Steel Structures Library: 1965.
- LU, J. **Influence of strain hardening, strain aging and the Bauschinger effect on steel tubular strut load capacity**. Wollongong: University of Wollongong, 1990.
- M. GERE, J; GOODNO, B. **Mechanics of Materials**: brief edition. Stamford: Cengage Learning, 2012.
- MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J.; HU, S. **Mechanics of Sheet Metal Forming**. 2 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.
- MELLO, G. Estruturas metálicas. Fundação Municipal de Ensino de Piracicaba. Escola de Engenharia de Piracicaba. 2012.

PFEIL, W. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 8ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 357p.

PIRES, O. **Melhoria da previsão do fenómeno de retorno elástico em processos de estampagem multi-etapa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projecto) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2014.

SALES, A. Análise da aplicação do método da resistência direta a perfis formados a frio com perfurações submetidos a compressão. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, área de concentração: Construção Metálica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, 2017.

SILVA, E; PIERIN, I; SILVA, V. **Estruturas compostas por perfis formados a frio**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil / CBCA, 2014. 192p;

SLOOF, P; SCHUSTER, R. **Yield Strength Increase of Cold Formed Sections Due to Cold Work of Forming**. Fifteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. St. Louis: 2000.

SMALLMAN, R; BISHOP, R. **Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering: Science, process, applications**. 6 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999.

SOUZA, S. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. 5 ed São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

TOTAL MATERIA. **Strain Ageing of Steel: Part One**. Disponível em: <<https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=PT&NM=392>> Acesso em: 26 de junho de 2018.

YU, W; LABOUBE, R. **Cold-formed steel design**. 4 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2010.

ANEXO A - PERFIL U SIMPLES – DIMENSÕES, MASSAS E PROPRIEDADES

GEOMÉTRICAS (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012)

Perfil	Dimensões					Eixo x					Eixo y						
	m kg/m	A cm ²	b _w mm	b _f mm	t = t _h mm	r _i mm	I _x cm ⁴	W _x cm ³	r _x cm	X _g cm	x ₀ cm	I _y cm ⁴	W _y cm ³	r _y cm	I _t cm ⁴	C _w cm ⁶	r ₀ cm
50 × 25 × 1,20	0,90	1,15	50	25	1,20	1,2	4,54	1,82	1,99	0,68	1,54	0,72	0,39	0,79	0,006	3,03	2,63
50 × 25 × 1,50	1,12	1,43	50	25	1,50	1,5	5,54	2,21	1,97	0,69	1,53	0,88	0,49	0,78	0,011	3,67	2,61
50 × 25 × 2,00	1,47	1,87	50	25	2,00	2	7,07	2,83	1,95	0,72	1,52	1,13	0,63	0,78	0,025	4,64	2,59
50 × 25 × 2,25	1,64	2,08	50	25	2,25	2,25	7,79	3,12	1,93	0,73	1,51	1,25	0,70	0,77	0,035	5,09	2,57
50 × 25 × 2,65	1,90	2,42	50	25	2,65	2,65	8,85	3,54	1,91	0,75	1,50	1,42	0,81	0,77	0,057	5,75	2,55
50 × 25 × 3,00	2,12	2,70	50	25	3,00	3	9,71	3,89	1,90	0,77	1,50	1,57	0,91	0,76	0,081	6,27	2,53
75 × 40 × 1,20	1,42	1,81	75	40	1,20	1,2	16,67	4,44	3,03	1,09	2,53	2,97	1,02	1,28	0,009	28,54	4,15
75 × 40 × 1,50	1,77	2,25	75	40	1,50	1,5	20,50	5,47	3,02	1,10	2,52	3,67	1,27	1,28	0,017	34,98	4,14
75 × 40 × 2,00	2,33	2,97	75	40	2,00	2	26,60	7,09	2,99	1,13	2,51	4,78	1,66	1,27	0,040	45,13	4,11
75 × 40 × 2,25	2,61	3,32	75	40	2,25	2,25	29,52	7,87	2,98	1,14	2,51	5,32	1,86	1,27	0,056	49,94	4,10
75 × 40 × 2,65	3,04	3,88	75	40	2,65	2,65	34,01	9,07	2,96	1,16	2,50	6,15	2,16	1,26	0,091	57,28	4,07
75 × 40 × 3,00	3,42	4,35	75	40	3,00	3	37,76	10,07	2,94	1,17	2,49	6,85	2,42	1,25	0,130	63,34	4,06
75 × 40 × 3,35	3,79	4,82	75	40	3,35	3,35	41,34	11,02	2,93	1,19	2,48	7,52	2,68	1,25	0,180	69,09	4,04
75 × 40 × 3,75	4,20	5,35	75	40	3,75	3,75	45,23	12,06	2,91	1,21	2,48	8,26	2,96	1,24	0,251	75,27	4,02
75 × 40 × 4,25	4,71	5,99	75	40	4,25	4,25	49,81	13,28	2,88	1,23	2,47	9,14	3,30	1,23	0,361	82,46	3,99
75 × 40 × 4,75	5,20	6,62	75	40	4,75	4,75	54,07	14,42	2,86	1,26	2,46	9,97	3,64	1,23	0,497	89,06	3,96
100 × 40 × 1,20	1,66	2,11	100	40	1,20	1,2	32,33	6,47	3,91	0,94	2,27	3,25	1,06	1,24	0,010	56,25	4,69
100 × 40 × 1,50	2,06	2,63	100	40	1,50	1,5	39,88	7,98	3,90	0,96	2,26	4,01	1,32	1,24	0,020	69,11	4,67
100 × 40 × 2,00	2,72	3,47	100	40	2,00	2	51,99	10,40	3,87	0,98	2,25	5,23	1,73	1,23	0,046	89,52	4,64
100 × 40 × 2,25	3,05	3,88	100	40	2,25	2,25	57,82	11,56	3,86	0,99	2,25	5,82	1,93	1,22	0,065	99,25	4,63
100 × 40 × 2,65	3,56	4,54	100	40	2,65	2,65	66,87	13,37	3,84	1,01	2,24	6,74	2,25	1,22	0,106	114,20	4,61
100 × 40 × 3,00	4,01	5,10	100	40	3,00	3	74,48	14,90	3,82	1,02	2,23	7,52	2,53	1,21	0,153	126,66	4,59
100 × 40 × 3,35	4,44	5,66	100	40	3,35	3,35	81,83	16,37	3,80	1,04	2,22	8,27	2,79	1,21	0,212	138,56	4,57
100 × 40 × 3,75	4,94	6,29	100	40	3,75	3,75	89,89	17,98	3,78	1,06	2,21	9,09	3,09	1,20	0,294	151,48	4,54
100 × 40 × 4,25	5,54	7,06	100	40	4,25	4,25	99,49	19,90	3,75	1,08	2,20	10,08	3,45	1,20	0,424	166,66	4,51
100 × 40 × 4,75	6,13	7,81	100	40	4,75	4,75	108,55	21,71	3,73	1,10	2,19	11,02	3,80	1,19	0,587	180,78	4,48
100 × 40 × 6,30	7,88	10,04	100	40	6,30	6,3	133,35	26,67	3,65	1,18	2,15	13,60	4,82	1,16	1,326	218,30	4,39
100 × 50 × 1,20	1,85	2,35	100	50	1,20	1,2	38,19	7,64	4,03	1,30	3,10	5,99	1,62	1,60	0,011	102,97	5,33
100 × 50 × 1,50	2,30	2,93	100	50	1,50	1,5	47,15	9,43	4,01	1,32	3,09	7,41	2,01	1,59	0,022	126,77	5,31
100 × 50 × 2,00	3,04	3,87	100	50	2,00	2	61,59	12,32	3,99	1,34	3,08	9,71	2,65	1,58	0,052	164,78	5,28
100 × 50 × 2,25	3,40	4,33	100	50	2,25	2,25	68,57	13,71	3,98	1,35	3,07	10,82	2,97	1,58	0,073	183,02	5,27

Perfil	Dimensões						Eixo x						Eixo y					
	m kg/m	A cm ²	b _w mm	b _f mm	t = t _n mm	r _i mm	I _x cm ⁴	W _x cm ³	r _x cm	X _g cm	x ₀ cm	I _y cm ⁴	W _y cm ³	r _y cm	I _t cm ⁴	C _w cm ⁶	r ₀ cm	
100 × 50 × 2,65	3,98	5,07	100	50	2,65	2,65	79,42	15,88	3,96	1,37	3,07	12,57	3,46	1,57	0,119	211,18	5,25	
100 × 50 × 3,00	4,48	5,70	100	50	3,00	3	88,60	17,72	3,94	1,39	3,06	14,05	3,89	1,57	0,171	234,81	5,23	
100 × 50 × 3,35	4,97	6,33	100	50	3,35	3,35	97,48	19,50	3,92	1,41	3,05	15,49	4,31	1,56	0,237	257,51	5,21	
100 × 50 × 3,75	5,52	7,04	100	50	3,75	3,75	107,26	21,45	3,90	1,42	3,04	17,09	4,78	1,56	0,330	282,34	5,19	
100 × 50 × 4,25	6,21	7,91	100	50	4,25	4,25	118,97	23,79	3,88	1,45	3,03	19,01	5,35	1,55	0,476	311,76	5,16	
100 × 50 × 4,75	6,88	8,76	100	50	4,75	4,75	130,09	26,02	3,85	1,47	3,02	20,86	5,91	1,54	0,658	339,43	5,13	
100 × 50 × 6,30	8,87	11,30	100	50	6,30	6,3	161,01	32,20	3,78	1,55	2,99	26,07	7,55	1,52	1,493	414,74	5,05	
100 × 75 × 2,65	5,02	6,39	100	75	2,65	2,65	110,82	22,16	4,16	2,38	5,27	38,21	7,47	2,44	0,150	645,05	7,15	
100 × 75 × 3,00	5,66	7,20	100	75	3,00	3	123,88	24,78	4,15	2,40	5,26	42,85	8,40	2,44	0,216	719,59	7,13	
100 × 75 × 3,35	6,28	8,01	100	75	3,35	3,35	136,59	27,32	4,13	2,42	5,26	47,40	9,33	2,43	0,299	791,79	7,11	
100 × 75 × 3,75	7,00	8,91	100	75	3,75	3,75	150,69	30,14	4,11	2,44	5,25	52,49	10,37	2,43	0,417	871,49	7,10	
100 × 75 × 4,25	7,87	10,03	100	75	4,25	4,25	167,67	33,53	4,09	2,46	5,24	58,68	11,66	2,42	0,603	966,96	7,07	
100 × 75 × 4,75	8,74	11,13	100	75	4,75	4,75	183,96	36,79	4,06	2,49	5,23	64,69	12,91	2,41	0,836	1057,95	7,05	
100 × 75 × 6,30	11,34	14,45	100	75	6,30	6,3	230,15	46,03	3,99	2,57	5,21	82,13	16,67	2,38	1,909	1312,73	6,98	
100 × 75 × 8,00	13,83	17,62	100	75	8,00	12	266,67	53,33	3,89	2,70	5,22	97,33	20,30	2,35	3,756	1547,82	6,92	
125 × 50 × 1,20	2,08	2,65	125	50	1,20	1,2	63,82	10,21	4,91	1,16	2,85	6,40	1,67	1,55	0,013	174,04	5,88	
125 × 50 × 1,50	2,59	3,30	125	50	1,50	1,5	78,93	12,63	4,89	1,18	2,84	7,92	2,07	1,55	0,025	214,57	5,86	
125 × 50 × 2,00	3,43	4,37	125	50	2,00	2	103,38	16,54	4,86	1,20	2,83	10,39	2,73	1,54	0,058	279,58	5,83	
125 × 50 × 2,25	3,84	4,90	125	50	2,25	2,25	115,26	18,44	4,85	1,21	2,82	11,59	3,06	1,54	0,083	310,91	5,82	
125 × 50 × 2,65	4,50	5,73	125	50	2,65	2,65	133,80	21,41	4,83	1,23	2,81	13,47	3,57	1,53	0,134	359,45	5,80	
125 × 50 × 3,00	5,07	6,45	125	50	3,00	3	149,55	23,93	4,81	1,24	2,80	15,07	4,01	1,53	0,193	400,35	5,78	
125 × 50 × 3,35	5,63	7,17	125	50	3,35	3,35	164,87	26,38	4,80	1,26	2,80	16,62	4,45	1,52	0,268	439,81	5,76	
125 × 50 × 3,75	6,26	7,98	125	50	3,75	3,75	181,85	29,10	4,78	1,28	2,79	18,35	4,93	1,52	0,373	483,18	5,73	
125 × 50 × 4,25	7,04	8,97	125	50	4,25	4,25	202,28	32,37	4,75	1,30	2,77	20,44	5,53	1,51	0,539	534,87	5,70	
125 × 50 × 4,75	7,81	9,95	125	50	4,75	4,75	221,87	35,50	4,72	1,32	2,76	22,45	6,11	1,50	0,747	583,83	5,67	
125 × 50 × 6,30	10,10	12,87	125	50	6,30	6,3	277,25	44,36	4,64	1,40	2,73	28,16	7,81	1,48	1,701	719,09	5,58	

Perfil	Dimensões				Eixo x				Eixo y								
	m kg/m	A cm ²	b _w mm	b _f mm	t = t _h mm	r _i mm	I _x cm ⁴	W _x cm ³	f _x cm	X _g cm	x ₀ cm	I _y cm ⁴	W _y cm ³	r _y cm	I _t cm ⁴	C _w cm ⁶	r ₀ cm
125 x 75 x 2,65	5,54	7,06	125	75	2,65	2,65	183,39	29,34	5,10	2,17	4,92	41,25	7,74	2,42	0,165	1090,88	7,49
125 x 75 x 3,00	6,24	7,95	125	75	3,00	3	205,37	32,86	5,08	2,19	4,92	46,29	8,72	2,41	0,238	1218,99	7,47
125 x 75 x 3,35	6,94	8,84	125	75	3,35	3,35	226,84	36,29	5,06	2,21	4,91	51,25	9,68	2,41	0,330	1343,56	7,45
125 x 75 x 3,75	7,73	9,85	125	75	3,75	3,75	250,76	40,12	5,05	2,22	4,90	56,79	10,77	2,40	0,461	1481,66	7,43
125 x 75 x 4,25	8,71	11,09	125	75	4,25	4,25	279,74	44,76	5,02	2,25	4,89	63,56	12,10	2,39	0,667	1648,01	7,41
125 x 75 x 4,75	9,67	12,32	125	75	4,75	4,75	307,72	49,24	5,00	2,27	4,88	70,14	13,42	2,39	0,926	1807,54	7,38
125 x 75 x 6,30	12,58	16,02	125	75	6,30	6,3	388,20	62,11	4,92	2,35	4,85	89,36	17,35	2,36	2,117	2260,41	7,30
125 x 75 x 8,00	15,40	19,62	125	75	8,00	12	455,07	72,81	4,82	2,47	4,86	106,87	21,25	2,33	4,182	2688,83	7,23
150 x 50 x 2,00	3,82	4,87	150	50	2,00	2	158,88	21,18	5,71	1,09	2,62	10,93	2,79	1,50	0,065	430,47	6,46
150 x 50 x 2,25	4,28	5,46	150	50	2,25	2,25	177,32	23,64	5,70	1,10	2,61	12,20	3,13	1,49	0,092	479,10	6,44
150 x 50 x 2,65	5,02	6,39	150	50	2,65	2,65	206,17	27,49	5,68	1,12	2,60	14,18	3,65	1,49	0,150	554,61	6,42
150 x 50 x 3,00	5,66	7,20	150	50	3,00	3	230,76	30,77	5,66	1,13	2,59	15,87	4,10	1,48	0,216	618,42	6,40
150 x 50 x 3,35	6,28	8,01	150	50	3,35	3,35	254,76	33,97	5,64	1,15	2,58	17,52	4,55	1,48	0,299	680,15	6,38
150 x 50 x 3,75	7,00	8,91	150	50	3,75	3,75	281,45	37,53	5,62	1,16	2,57	19,35	5,04	1,47	0,417	748,21	6,35
150 x 50 x 4,25	7,87	10,03	150	50	4,25	4,25	313,74	41,83	5,59	1,19	2,56	21,57	5,66	1,47	0,603	829,62	6,32
150 x 50 x 4,75	8,74	11,13	150	50	4,75	4,75	344,84	45,98	5,57	1,21	2,55	23,70	6,25	1,46	0,836	907,06	6,29
150 x 50 x 6,30	11,34	14,45	150	50	6,30	6,3	433,86	57,85	5,48	1,28	2,51	29,80	8,01	1,44	1,909	1123,08	6,20
150 x 50 x 8,00	13,83	17,62	150	50	8,00	12	503,31	67,11	5,34	1,38	2,50	35,23	9,72	1,41	3,756	1320,98	6,07
150 x 75 x 2,65	6,06	7,72	150	75	2,65	2,65	278,09	37,08	6,00	2,00	4,63	43,77	7,95	2,38	0,181	1677,77	7,94
150 x 75 x 3,00	6,83	8,70	150	75	3,00	3	311,80	41,57	5,99	2,01	4,62	49,14	8,96	2,38	0,261	1876,92	7,92
150 x 75 x 3,35	7,60	9,68	150	75	3,35	3,35	344,82	45,98	5,97	2,03	4,61	54,42	9,95	2,37	0,362	2071,06	7,91
150 x 75 x 3,75	8,47	10,79	150	75	3,75	3,75	381,72	50,90	5,95	2,05	4,60	60,35	11,07	2,37	0,505	2286,90	7,88
150 x 75 x 4,25	9,54	12,16	150	75	4,25	4,25	426,60	56,88	5,92	2,07	4,59	67,58	12,45	2,36	0,731	2547,82	7,86
150 x 75 x 4,75	10,60	13,51	150	75	4,75	4,75	470,11	62,68	5,90	2,09	4,58	74,63	13,81	2,35	1,015	2799,05	7,83
150 x 75 x 6,30	13,81	17,60	150	75	6,30	6,3	596,48	79,53	5,82	2,17	4,55	95,30	17,87	2,33	2,326	3518,53	7,75
150 x 75 x 8,00	16,97	21,62	150	75	8,00	12	704,95	93,99	5,71	2,28	4,54	114,65	21,96	2,30	4,608	4209,87	7,65
200 x 50 x 2,00	4,61	5,87	200	50	2,00	2	317,32	31,73	7,35	0,92	2,28	11,74	2,88	1,41	0,078	848,40	7,83
200 x 50 x 2,25	5,17	6,58	200	50	2,25	2,25	354,62	35,46	7,34	0,93	2,28	13,11	3,22	1,41	0,111	945,18	7,81
200 x 50 x 2,65	6,06	7,72	200	50	2,65	2,65	413,21	41,32	7,32	0,95	2,27	15,24	3,76	1,41	0,181	1095,90	7,79
200 x 50 x 3,00	6,83	8,70	200	50	3,00	3	463,39	46,34	7,30	0,96	2,26	17,07	4,23	1,40	0,261	1223,68	7,77
200 x 50 x 3,35	7,60	9,68	200	50	3,35	3,35	512,58	51,26	7,28	0,98	2,25	18,85	4,68	1,40	0,362	1347,72	7,74
200 x 50 x 3,75	8,47	10,79	200	50	3,75	3,75	567,56	56,76	7,25	0,99	2,24	20,83	5,20	1,39	0,505	1484,95	7,72

Perfil	Dimensões					Eixo x					Eixo y						
	m	A	b _w	b _f	t = t _h	r _i	l _x	W _x	r _x	X _g	x ₀	l _y	W _y	r _y	I _t	C _w	r ₀
U	kg/m	cm ²	mm	mm	mm	mm	cm ⁴	cm ³	cm	cm	cm	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ⁶	cm
200 x 50 x 4,25	9,54	12,16	200	50	4,25	4,25	634,48	63,45	7,22	1,02	2,23	23,23	5,83	1,38	0,731	1649,85	7,69
200 x 50 x 4,75	10,60	13,51	200	50	4,75	4,75	699,39	69,94	7,20	1,04	2,21	25,55	6,45	1,38	1,015	1807,54	7,65
200 x 50 x 6,30	13,81	17,60	200	50	6,30	6,30	888,08	88,81	7,10	1,11	2,18	32,20	8,27	1,35	2,326	2252,32	7,55
200 x 50 x 8,00	16,97	21,62	200	50	8,00	12	1045,75	104,57	6,95	1,20	2,15	38,34	10,08	1,33	4,608	2668,14	7,40
200 x 75 x 2,65	7,10	9,04	200	75	2,65	2,65	542,22	54,22	7,74	1,72	4,14	47,70	8,26	2,30	0,211	3312,18	9,07
200 x 75 x 3,00	8,01	10,20	200	75	3,00	3	608,93	60,89	7,72	1,74	4,13	53,58	9,30	2,29	0,306	3710,53	9,05
200 x 75 x 3,35	8,91	11,36	200	75	3,35	3,35	674,51	67,45	7,71	1,75	4,12	59,37	10,33	2,29	0,424	4100,12	9,03
200 x 75 x 3,75	9,94	12,66	200	75	3,75	3,75	748,10	74,81	7,69	1,77	4,11	65,87	11,50	2,28	0,593	4534,78	9,01
200 x 75 x 4,25	11,21	14,28	200	75	4,25	4,25	838,04	83,80	7,66	1,79	4,10	73,83	12,94	2,27	0,859	5062,47	8,98
200 x 75 x 4,75	12,47	15,88	200	75	4,75	4,75	925,74	92,57	7,63	1,82	4,09	81,59	14,36	2,27	1,193	5573,07	8,95
200 x 75 x 6,30	16,29	20,75	200	75	6,30	6,30	1183,54	118,35	7,55	1,89	4,05	104,47	18,61	2,24	2,742	7050,81	8,86
200 x 75 x 8,00	20,11	25,62	200	75	8,00	12	1414,39	141,44	7,43	1,99	4,03	126,56	22,95	2,22	5,461	8497,13	8,74
200 x 100 x 2,65	8,14	10,37	200	100	2,65	2,65	671,23	67,12	8,05	2,62	6,19	105,35	14,28	3,19	0,242	7230,50	10,64
200 x 100 x 3,00	9,19	11,70	200	100	3,00	3	754,46	75,45	8,03	2,64	6,18	118,54	16,10	3,18	0,351	8113,14	10,62
200 x 100 x 3,35	10,23	13,03	200	100	3,35	3,35	836,45	83,64	8,01	2,65	6,17	131,57	17,91	3,18	0,487	8979,48	10,60
200 x 100 x 3,75	11,41	14,54	200	100	3,75	3,75	928,63	92,86	7,99	2,67	6,16	146,24	19,96	3,17	0,681	9949,85	10,58
200 x 100 x 4,25	12,88	16,41	200	100	4,25	4,25	1041,61	104,16	7,97	2,70	6,15	164,29	22,49	3,16	0,987	11133,57	10,55
200 x 100 x 4,75	14,33	18,26	200	100	4,75	4,75	1152,09	115,21	7,94	2,72	6,14	182,00	25,00	3,16	1,372	12285,30	10,53
200 x 100 x 6,30	18,76	23,90	200	100	6,30	6,30	1479,01	147,90	7,87	2,79	6,11	234,76	32,57	3,13	3,158	15657,61	10,44
200 x 100 x 8,00	23,25	29,62	200	100	8,00	12	1783,03	178,30	7,76	2,90	6,10	286,79	40,39	3,11	6,313	19025,36	10,35
250 x 100 x 2,65	9,18	11,69	250	100	2,65	2,65	1122,57	89,81	9,80	2,34	5,69	112,63	14,70	3,10	0,273	12228,31	11,75
250 x 100 x 3,00	10,37	13,20	250	100	3,00	3	1262,96	101,04	9,78	2,36	5,68	126,77	16,58	3,10	0,396	13732,54	11,73
250 x 100 x 3,35	11,54	14,71	250	100	3,35	3,35	1401,53	112,12	9,76	2,37	5,67	140,74	18,45	3,09	0,550	15211,69	11,71
250 x 100 x 3,75	12,88	16,41	250	100	3,75	3,75	1557,70	124,62	9,74	2,39	5,66	156,50	20,56	3,09	0,769	16871,78	11,68
250 x 100 x 4,25	14,55	18,53	250	100	4,25	4,25	1749,62	139,97	9,72	2,41	5,65	175,89	23,18	3,08	1,115	18901,83	11,65
250 x 100 x 4,75	16,20	20,63	250	100	4,75	4,75	1937,89	155,03	9,69	2,43	5,64	194,93	25,76	3,07	1,550	20882,49	11,62
250 x 100 x 6,30	21,23	27,05	250	100	6,30	6,30	2498,72	199,90	9,61	2,50	5,60	251,83	33,59	3,05	3,575	26716,05	11,54
250 x 100 x 6,35	21,26	27,08	250	100	6,35	9,525	2488,67	199,09	9,59	2,52	5,61	252,56	33,77	3,05	3,636	26896,67	11,52
250 x 100 x 8,00	26,39	33,62	250	100	8,00	12	3031,02	242,48	9,49	2,60	5,58	308,79	41,74	3,03	7,165	32599,97	11,42
300 x 100 x 2,65		13,02	300	100	2,65	2,65	1720,72	114,71	11,50	2,11	5,27	118,43	15,02	3,02	0,304	18787,48	13,00
300 x 100 x 3,00	11,54	14,70	300	100	3,00	3	1937,22	129,15	11,48	2,13	5,26	133,32	16,94	3,01	0,441	21110,31	12,98
300 x 100 x 3,35	12,86	16,38	300	100	3,35	3,35	2151,24	143,42	11,46	2,15	5,25	148,04	18,85	3,01	0,612	23397,20	12,96

Perfil	Dimensões						Eixo x						Eixo y					
	m kg/m	A cm ²	b _w mm	b _f mm	t = t _n mm	r _i mm	I _x cm ⁴	W _x cm ³	r _x cm	X _g cm	x ₀ cm	I _y cm ⁴	W _y cm ³	r _y cm	I _t cm ⁴	C _w cm ⁶	r ₀ cm	
300 × 100 × 3,75	14,36	18,29	300	100	3,75	3,75	2392,81	159,52	11,44	2,16	5,24	164,65	21,01	3,00	0,856	25967,19	12,93	
300 × 100 × 4,25	16,22	20,66	300	100	4,25	4,25	2690,26	179,35	11,41	2,18	5,23	185,10	23,68	2,99	1,242	29114,97	12,90	
300 × 100 × 4,75	18,06	23,01	300	100	4,75	4,75	2982,71	198,85	11,39	2,21	5,21	205,20	26,33	2,99	1,729	32191,74	12,87	
300 × 100 × 6,30	23,70	30,20	300	100	6,30	6,3	3857,91	257,19	11,30	2,27	5,18	265,33	34,35	2,96	3,991	41288,31	12,78	
300 × 100 × 8,00	29,53	37,62	300	100	8,00	12	4700,96	313,40	11,18	2,37	5,15	326,12	42,73	2,94	8,018	50522,51	12,66	

ANEXO B – CERTIFICADO DE QUALIDADE CHAPA DE AÇO CARBONO CST COR 400 COM DOBRA DE 90°

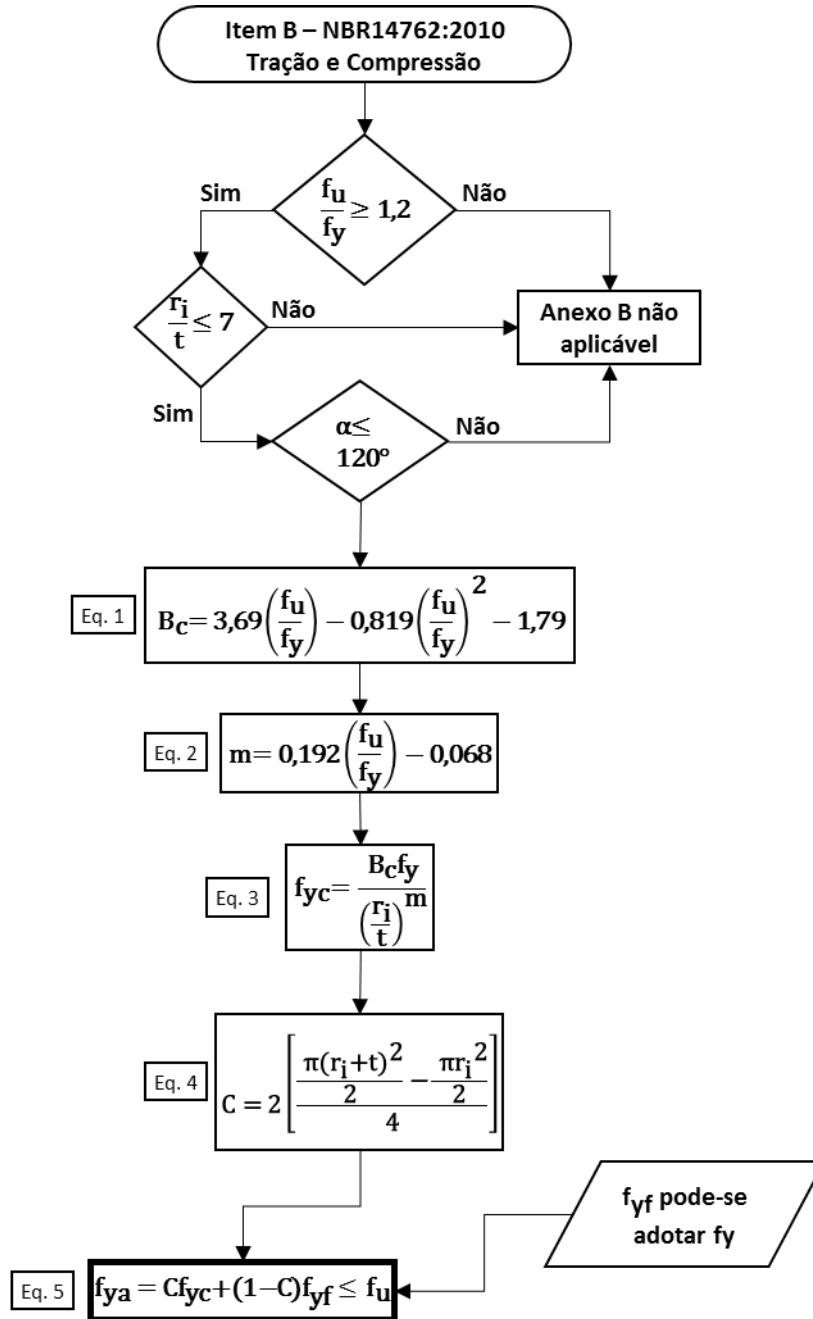
ARCELORMITTAL BRASIL S.A.		Certificado de Qualidade / Mill Sheet / Quality Certificate				Página 1 de 01									
Usina / Plant: AceitorMittal Tubarão Av. Brigadeiro Eduardo Gomes, 526, Polo Industrial Tubarão, Serra-ES, CEP 29160-904 CNPJ: 17.469.701/0104-82 Telefone: +55(27)3348-1240/ 3348-2220 Fax: +55(27)3348-1492/ 3948-2271		Ordem de Venda / Order No:	3198675 - SETEMBRO - 17	Nº do pedido do cliente / Buyer ref. No:	000447700101	Nº do certificado / Certificate Customer Ref. No:	20.10.2017								
PERFILADOS RIO DOCE SA Consumidor / Customer:		7338337 / 000023	3198675 - SETEMBRO - 17	Cliente final / End user:	PERFILADOS RIO DOCE SA										
Produto / Product: Bobina Laminada a Quente / Hot Rolled Coil		PERFILADOS RIO DOCE SA		Norma do Produto / Product Standard:	CST COR 400	Part Number:									
Distribuição e Centros de Serviços - Corte em Chapas Service AND DISTRIBUTION CENTERS - CUT TO LENGTH		Natural	Nominal	Cond. Especial / Special Cond.	NORMAL	CONFORME NORMA									
Espessura / Thickness: (MM) 4,75		Nº Protocolo / No Protocol:													
Composição Química / Chemical Composition (%) - L = Análise de Produto / Product Analysis															
Cod.	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Ti	B	Ca
ZS0001	0,08	0,367	0,540	0,029	0,0008	0,026	0,012	0,010	0,383	0,001	0,0005	0,0035	0,002	0,0002	0,0003

Nº da amostra / Sample No	Tensão / Tensile		Dureza / Hardness		BH	Impacto / Charpy		DWT		T. Grau / Grain		Inclusões / Inclusion	Anisotropia / Anisotropy	Expansão de furo / Hole expansion
	Unidade / Unit = MPa	Base / Basis = GL=50mm, W=12,5mm	Teste / Test	Posição / Position		Unid. Temp. / Temp. Unit	Unid. Energy / Energy Unit	Unid. Temp. / Temp. Unit	CPTS	Unid. Temp. / Temp. Unit	CPTS			
T0450617T	LR / TS	473	LR / TS	80	BH	TRB / TRH	1 2 3	Med / Ave	1 2 3	Med / Ave	T04 / A02			
	LF / TS	378	LF / TS	72	BH						T04 / F03			
	Along / Elong	54	Along / Elong	72										
	Red Area (%)	100	Red Area (%)	110										
	Pos. Dir / Position		Pos. Dir / Position											
	Along / Along		Along / Along											
	Along / Along		Along / Along											

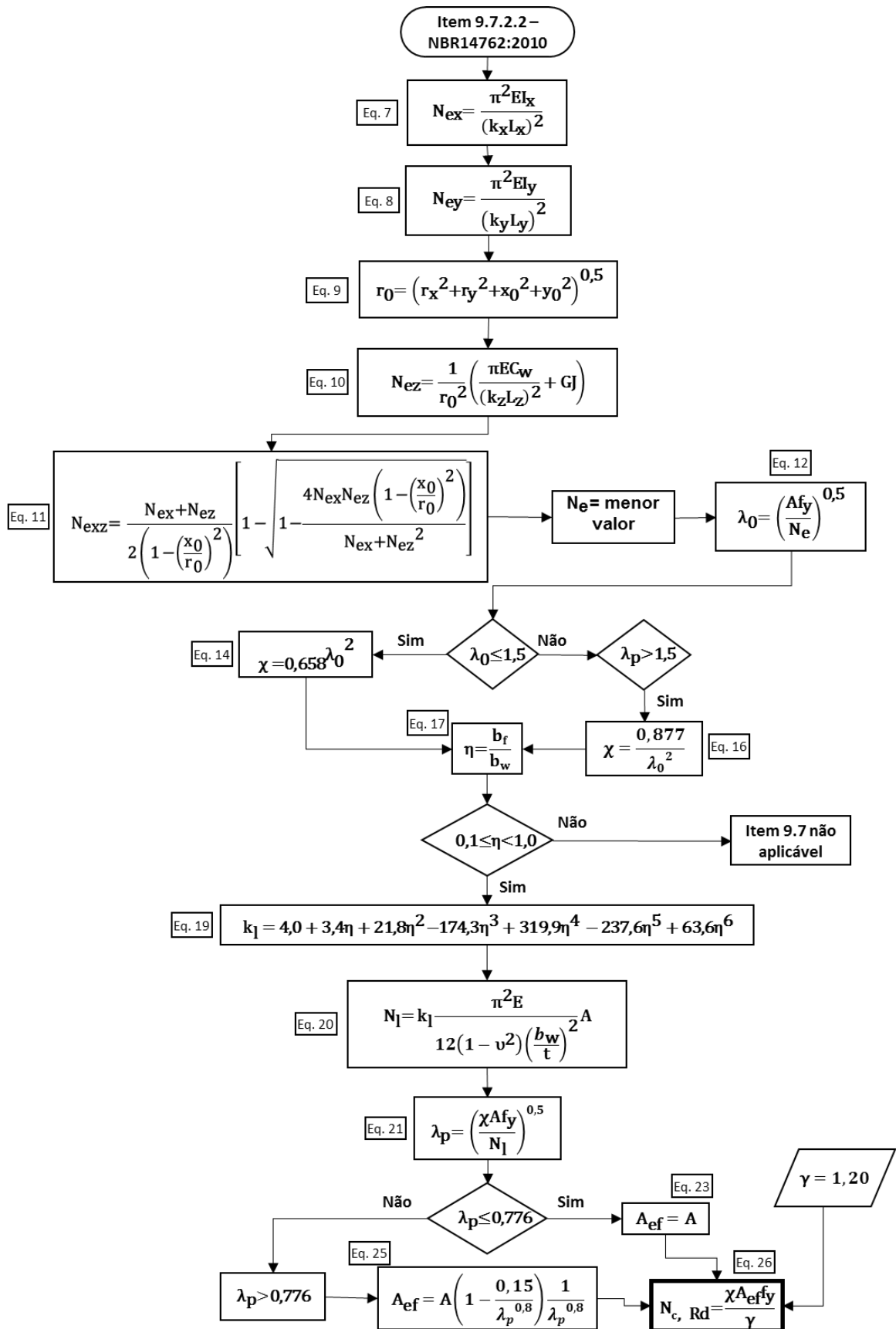
Número do lote / Lot ID	Peso lbr / Net Weight	Comprimento / Length	Espessura / Thickness	Amostras / Samples		Obs.
				Amostra 1 / Sample 1	Amostra 2 / Sample 2	
FA050791	12.110	2206606	269,00	T0450617T		
						(A) POSIÇÃO / POSITION 1 - Topo / Head 2 - Meio / Edge 3 - Base / Tail 4 - 90° / 90° 5 - 180° / 180° 6 - 135° / 135° 7 - 45° / 45° 8 - 0° / 0° 9 - 180° / 180° 10 - 90° / 90° 11 - 135° / 135° 12 - 45° / 45° 13 - 0° / 0°


André Carvalho Prado
 Gerente de Assistência Técnica e Clientes
 Customer Technical Support Manager

**APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DE CÁLCULO DO AUMENTO DA TENSÃO DE
ESCOAMENTO DEVIDO AO EFEITO DO TRABALHO A FRIO PARA
TRAÇÃO E COMPRESSÃO**



APÊNDICE B – FLUXOGRAMA DE CÁLCULO DO ESFORÇO RESISTENTE DE CÁLCULO DE PERFIS U SIMPLES SUBMETIDOS A COMPRESSÃO CENTRADA



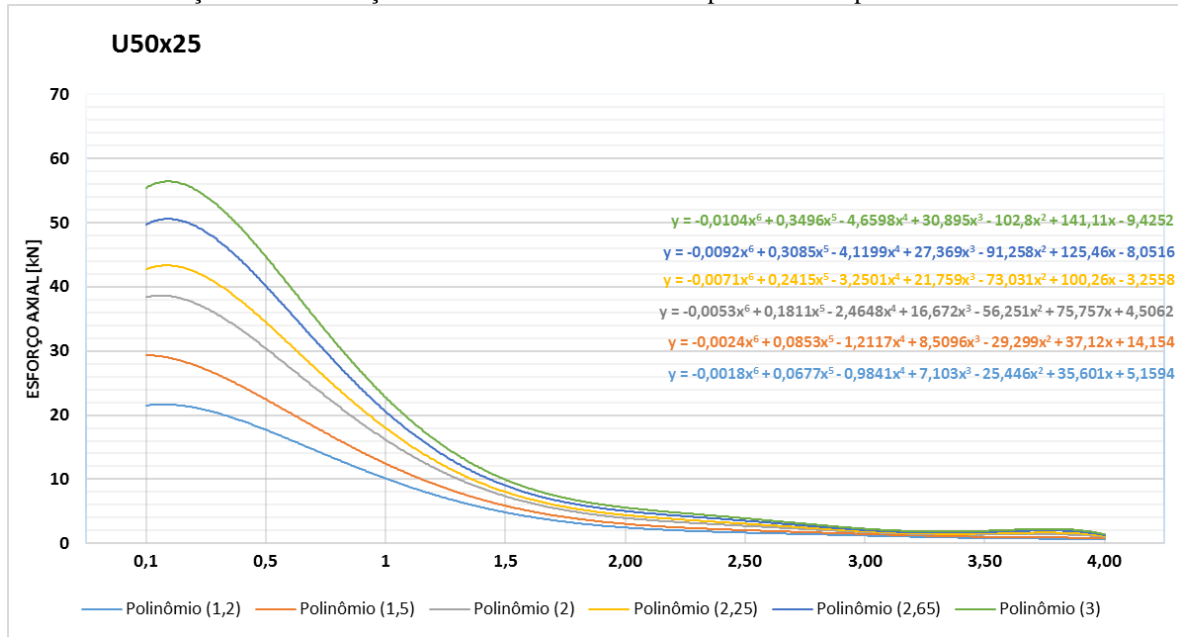
APÊNDICE C – GRÁFICOS DOS ESFORÇOS RESISTENTES DE CÁLCULOS DE PERFIS U SIMPLES SUBMETIDOS A COMPRESSÃO, SEM E COM EFEITO DO TRABALHO A FRIO

Esta seção irá apresentar todos os gráficos de tendência de comportamento do esforço resistente de cálculo dos perfis U simples formados a frio submetidos a compressão de 0,1 até 4 metros, considerando a tensão de escoamento do material virgem (25 kN/cm^2), como também considerando ao aumento da tensão de escoamento devido ao efeito do trabalho a frio. Serão apresentados os gráficos para cada grupo de perfil U simples. O grupo de perfil U simples é formado pelos perfis que possuem as mesmas dimensões de altura e largura da aba. Cada espessura de chapa será representada pelas diferentes cores curvas e equações do gráfico. Todas as equações possuem um grau de aproximação maior que 99,9%.

A representação gráfica não leva em consideração as limitações e requisitos definidos pela NBR14762:2010, tais como a limitação de esbeltez para barras comprimidas e a limitação da área efetiva para utilização do aumento da tensão de escoamento devido ao efeito do trabalho a frio. Estes requisitos não foram considerados porque alguns perfis não atendem a essas limitações dependendo do comprimento da barra e não seria possível obter as equações de tendência se não houvesse todos os valores de 0,1 até 4 metros.

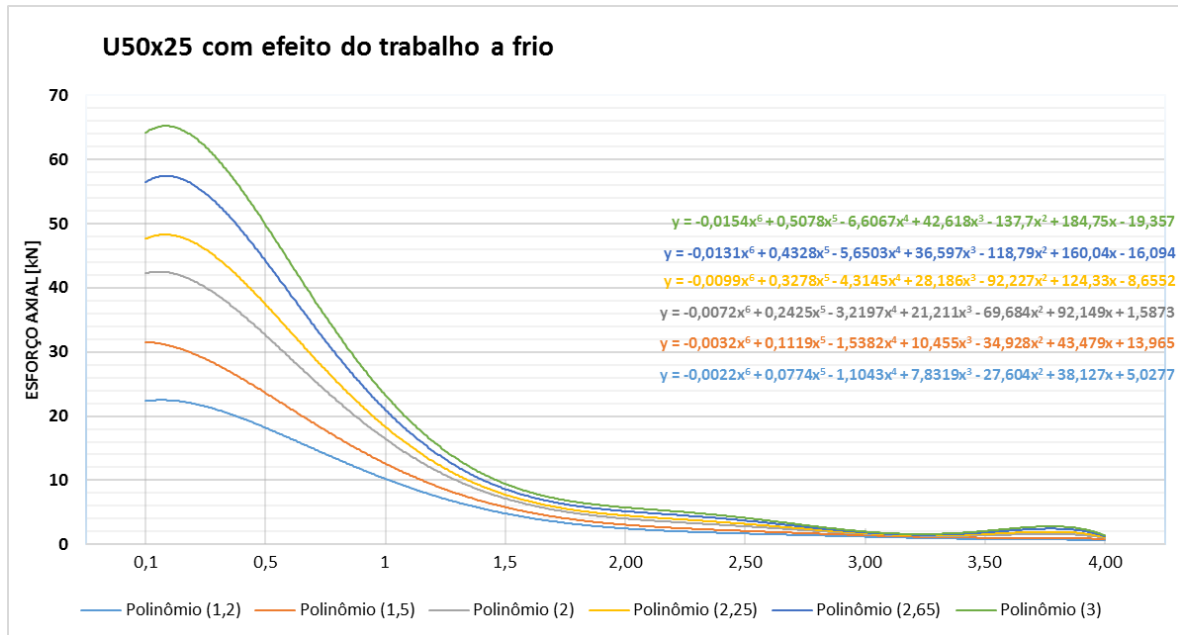
Dessa forma, as equações de tendência apresentadas abaixo podem ser utilizadas para obter o esforço resistente de cálculo, mas não significa que o perfil escolhido atende aos requisitos mencionados anteriormente. Para isso, deve-se realizar o cálculo da esbeltez e da área efetiva do perfil, já mencionados nos itens 3.2 e 5.2.2.

Gráfico C. 1 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 50 x 25.



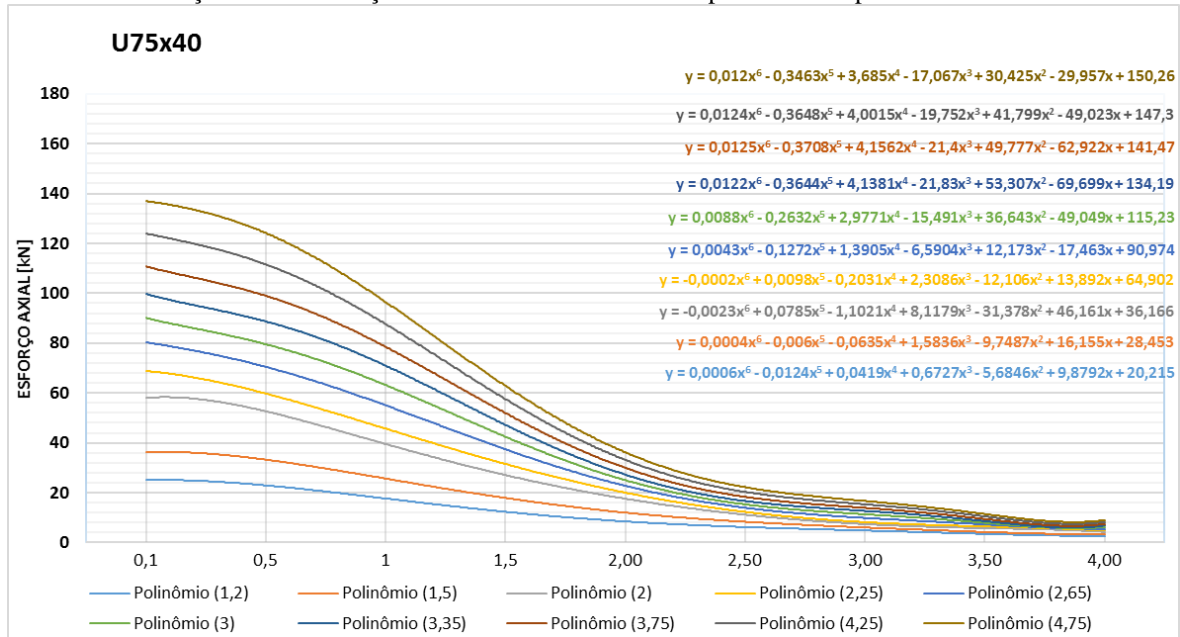
Fonte: O autor.

Gráfico C. 2 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 50 x 25



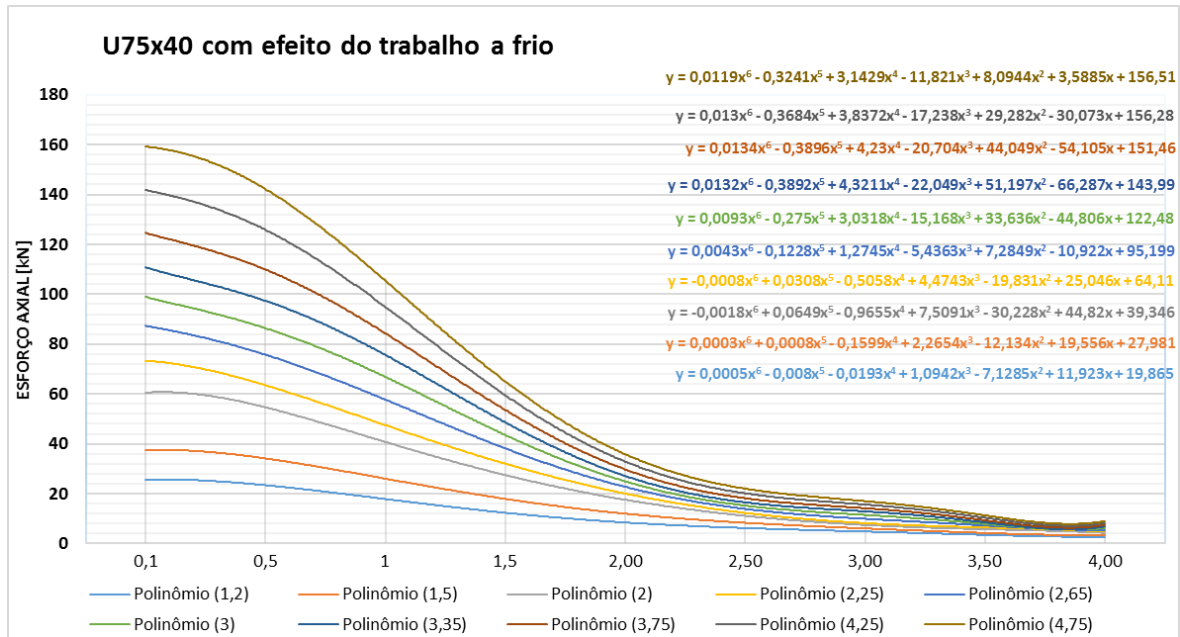
Fonte: O autor.

Gráfico C. 3 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 75 x 40



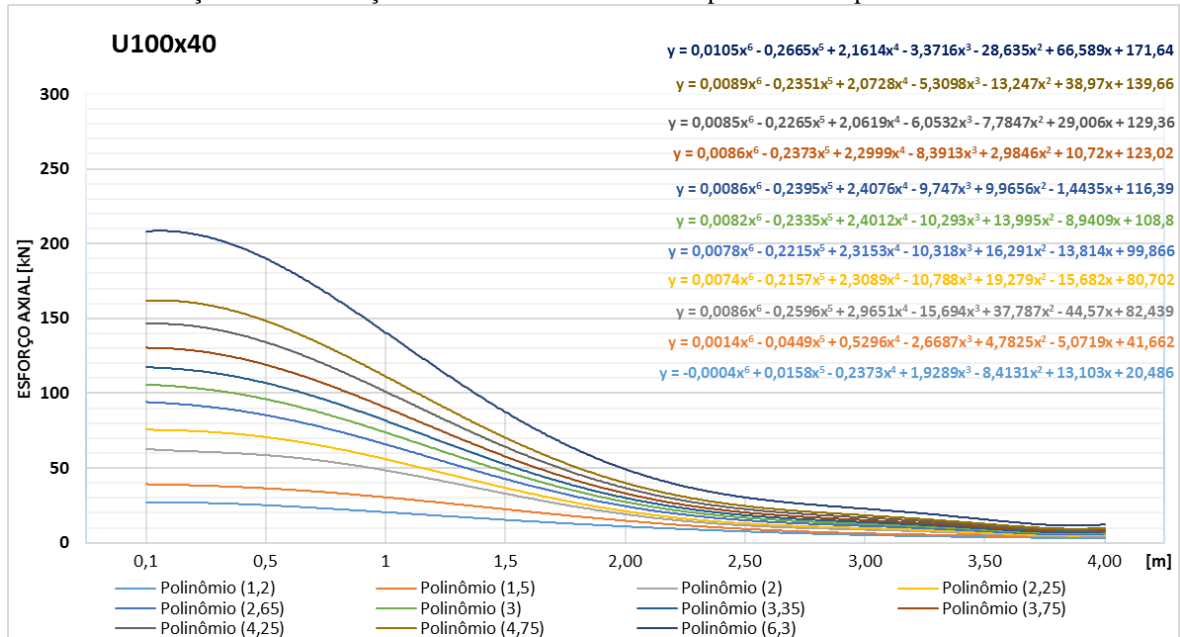
Fonte: O autor.

Gráfico C. 4 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 75 x 40



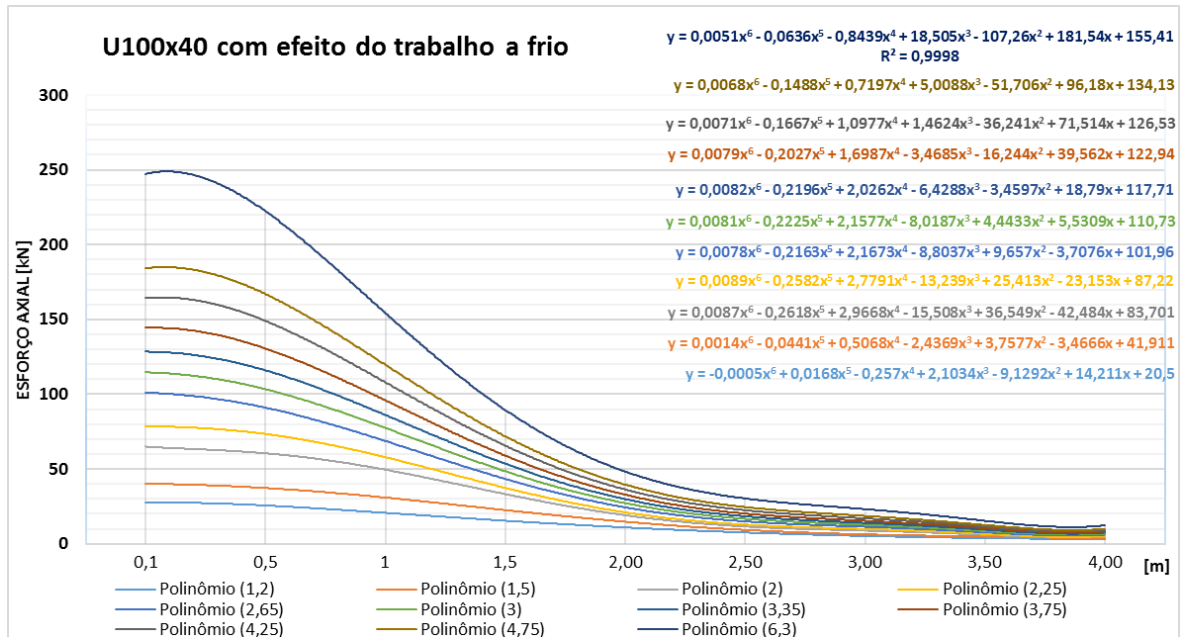
Fonte: O autor.

Gráfico C. 5 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 100 x 40



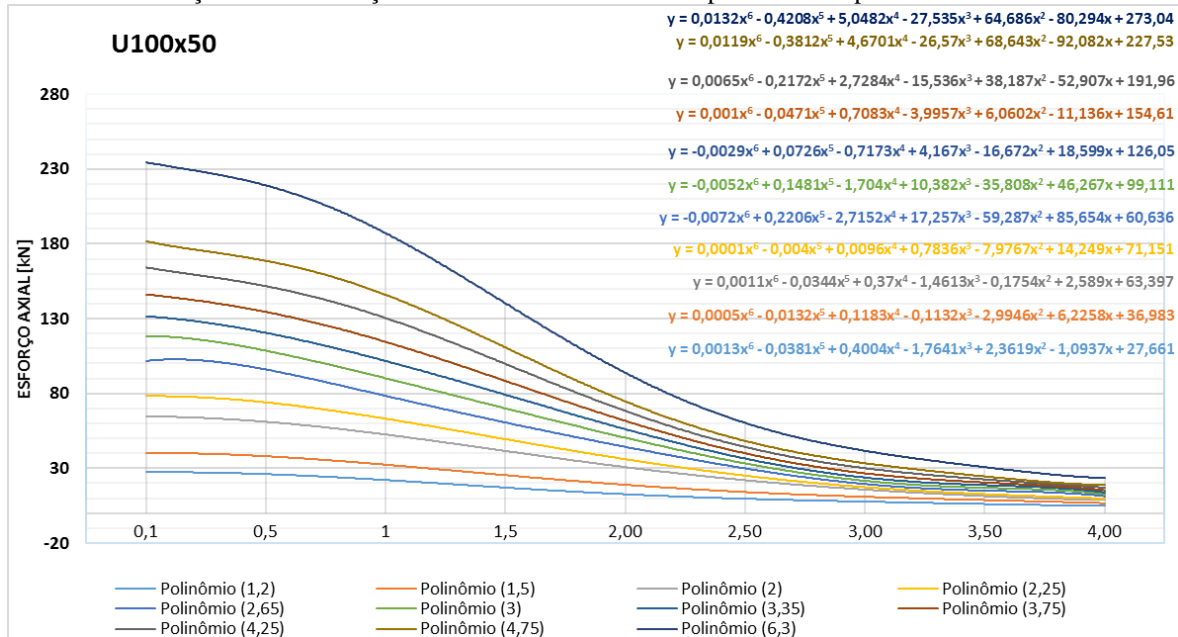
Fonte: O autor.

Gráfico C. 6 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 100 x 40



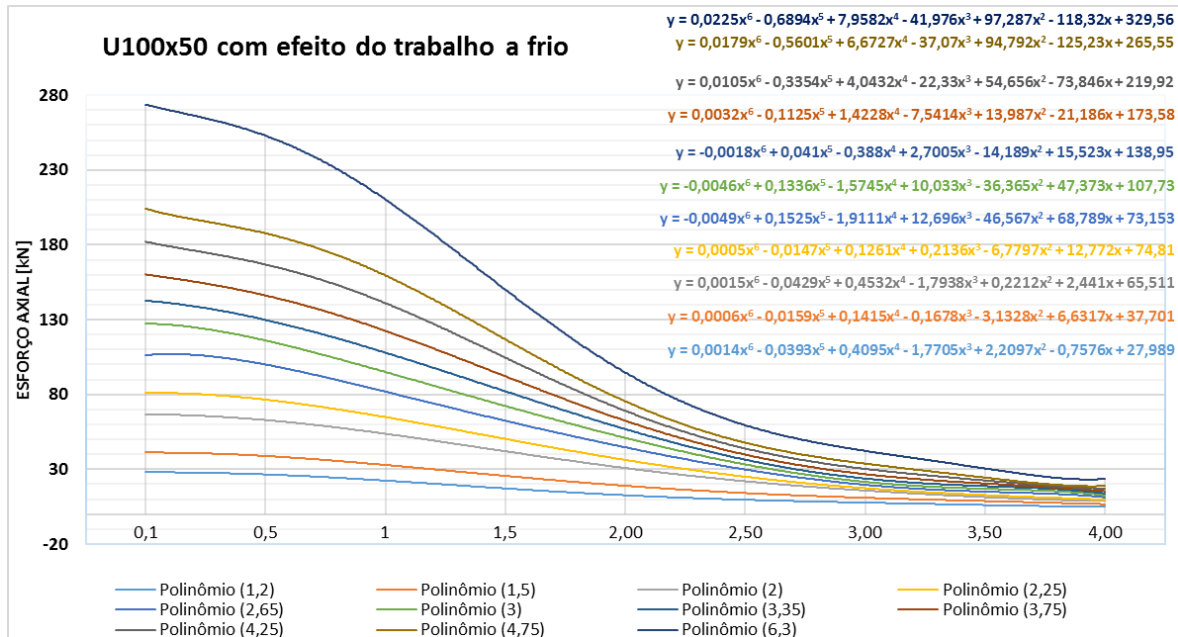
Fonte: O autor.

Gráfico C. 7 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 100 x 50



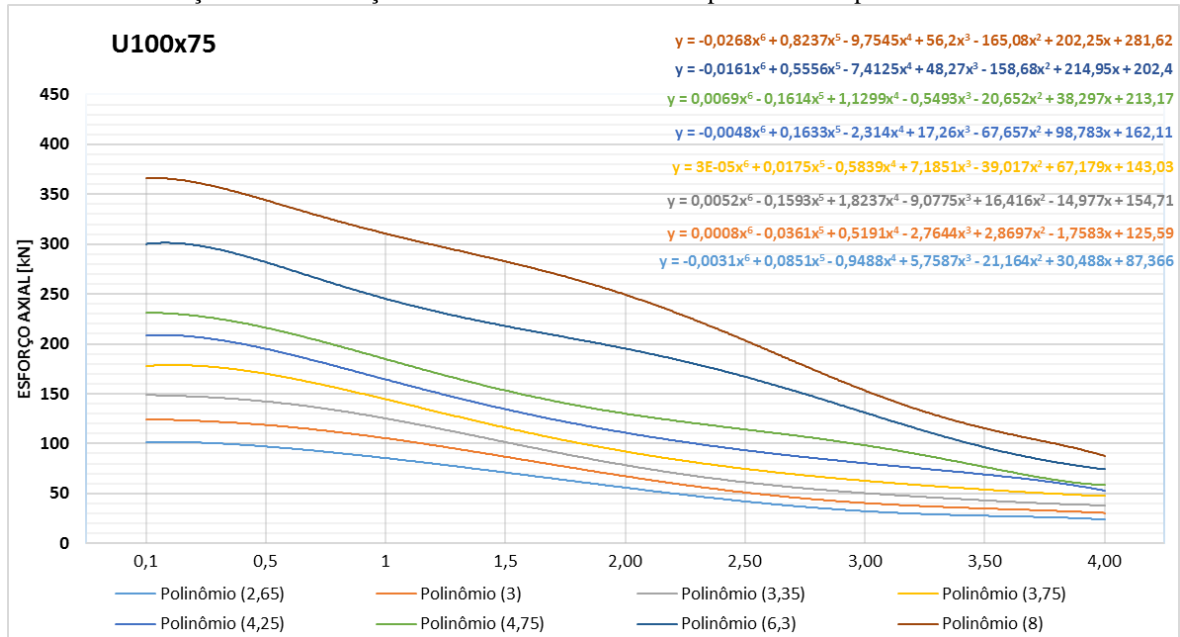
Fonte: O autor.

Gráfico C. 8 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 100 x 50



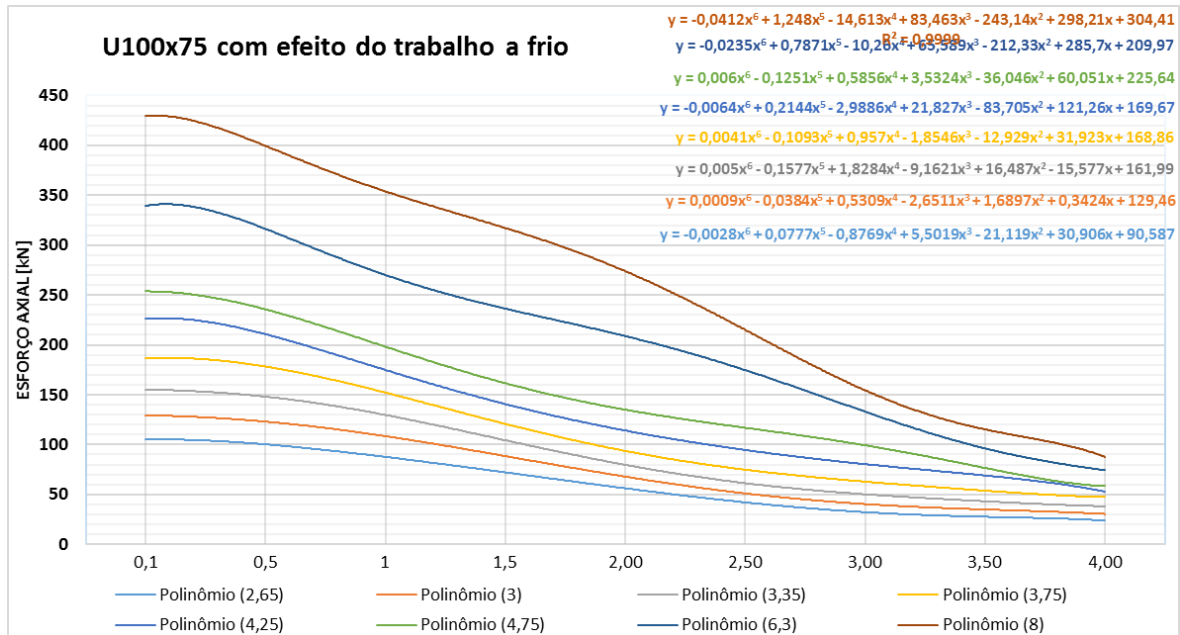
Fonte: O autor.

Gráfico C. 9 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 100 x 75



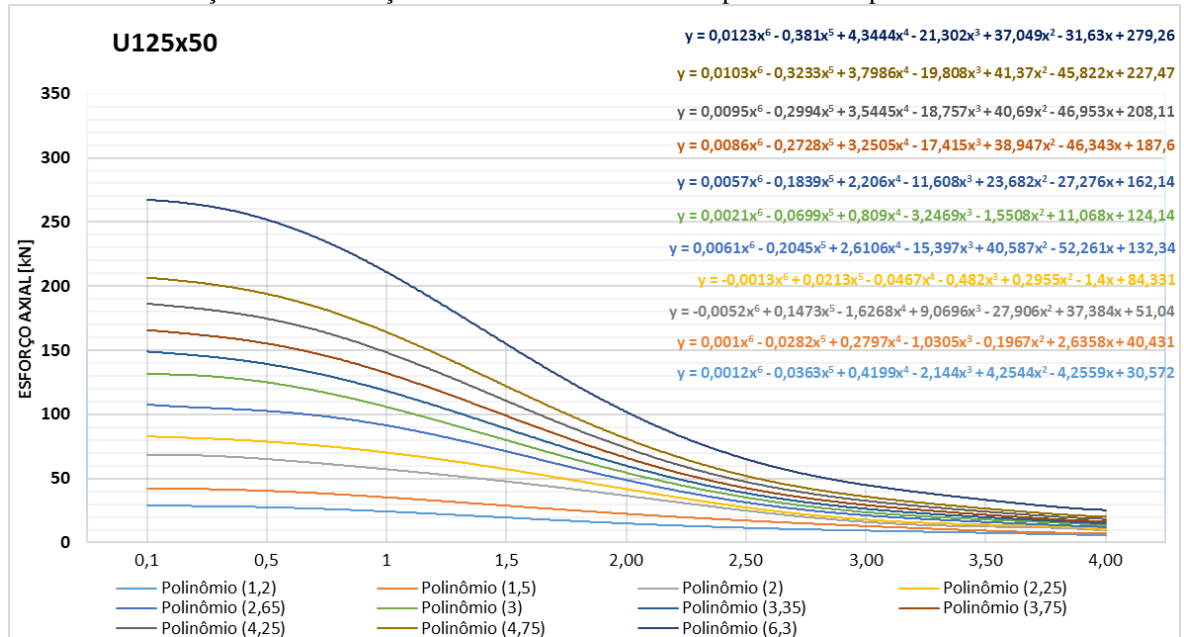
Fonte: O autor.

Gráfico C. 10 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 100 x 75



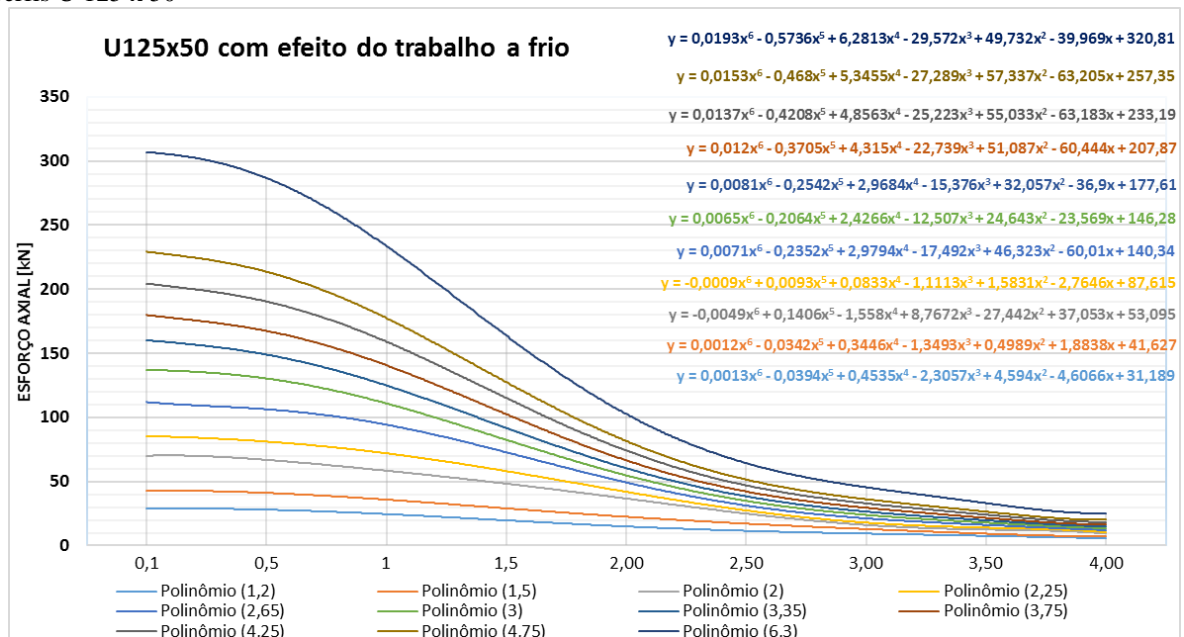
Fonte: O autor.

Gráfico C. 11 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 125 x 50



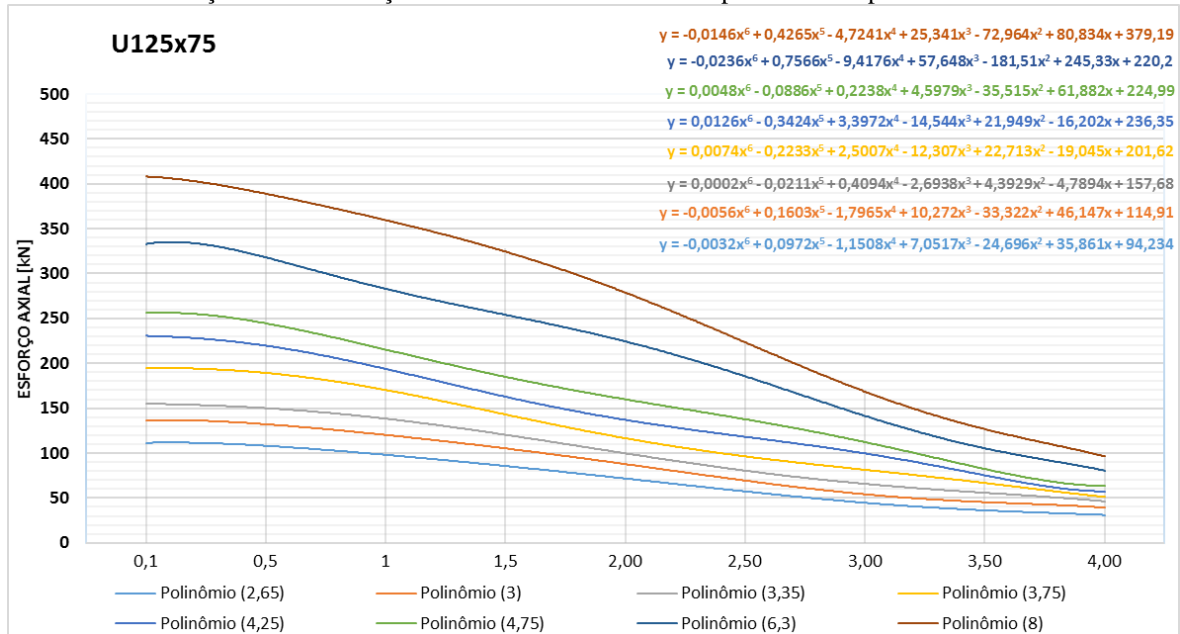
Fonte: O autor.

Gráfico C. 12 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 125 x 50



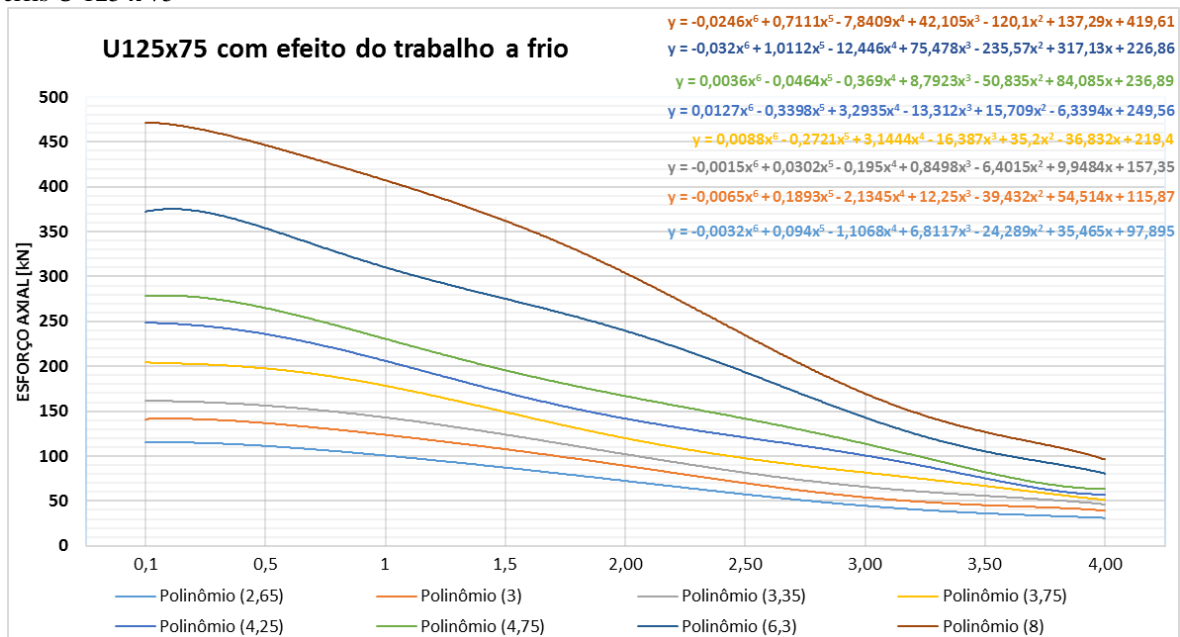
Fonte: O autor.

Gráfico C. 13 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 125 x 75



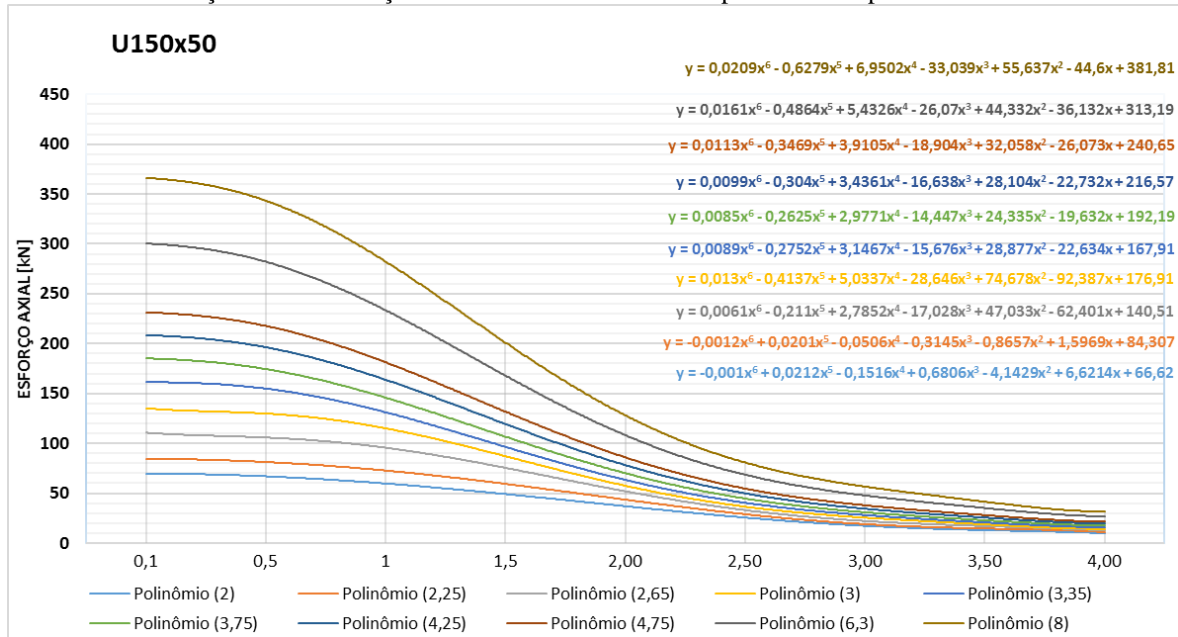
Fonte: O autor.

Gráfico C. 14 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 125 x 75



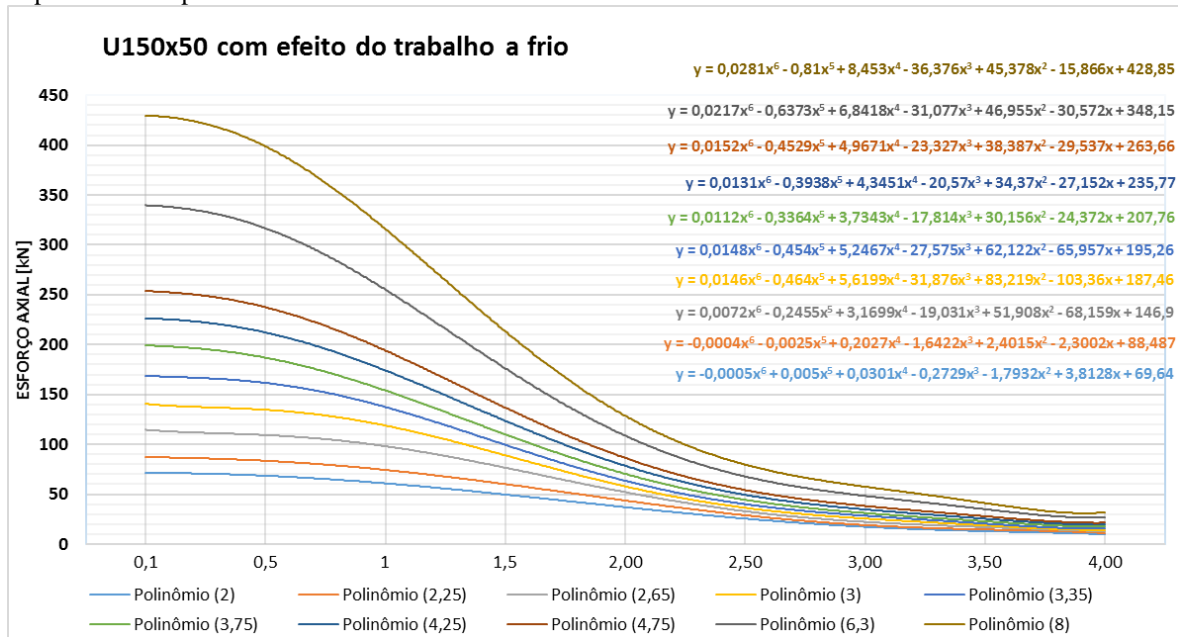
Fonte: O autor.

Gráfico C. 15 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 150 x 50



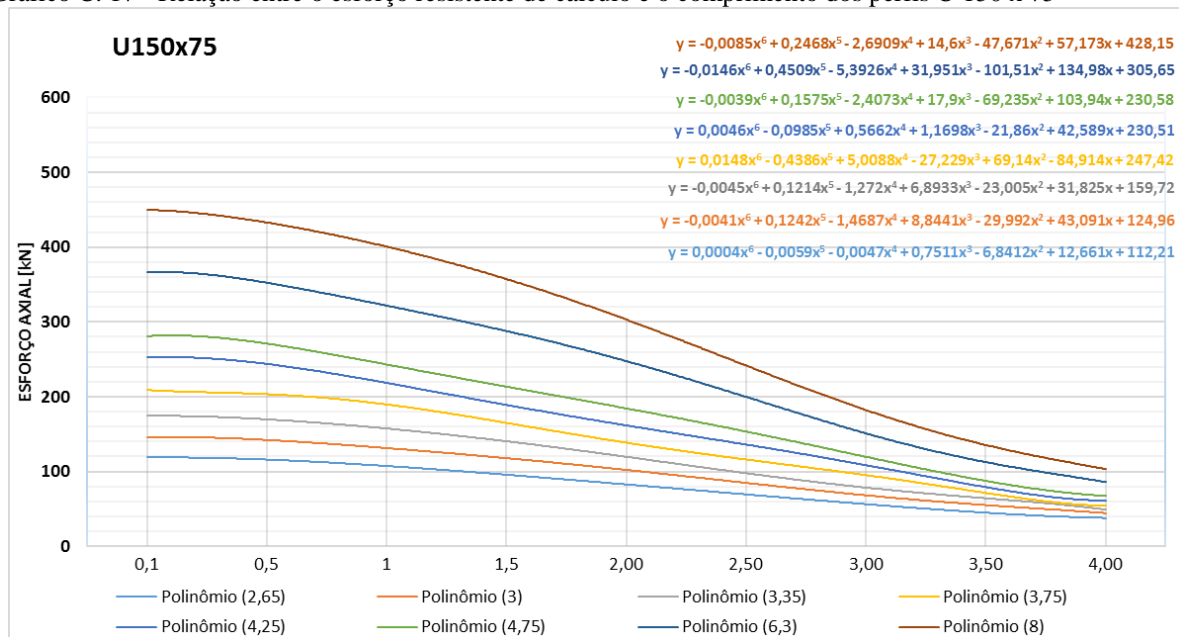
Fonte: O autor.

Gráfico C. 16 - C.16 – Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 150 x 50



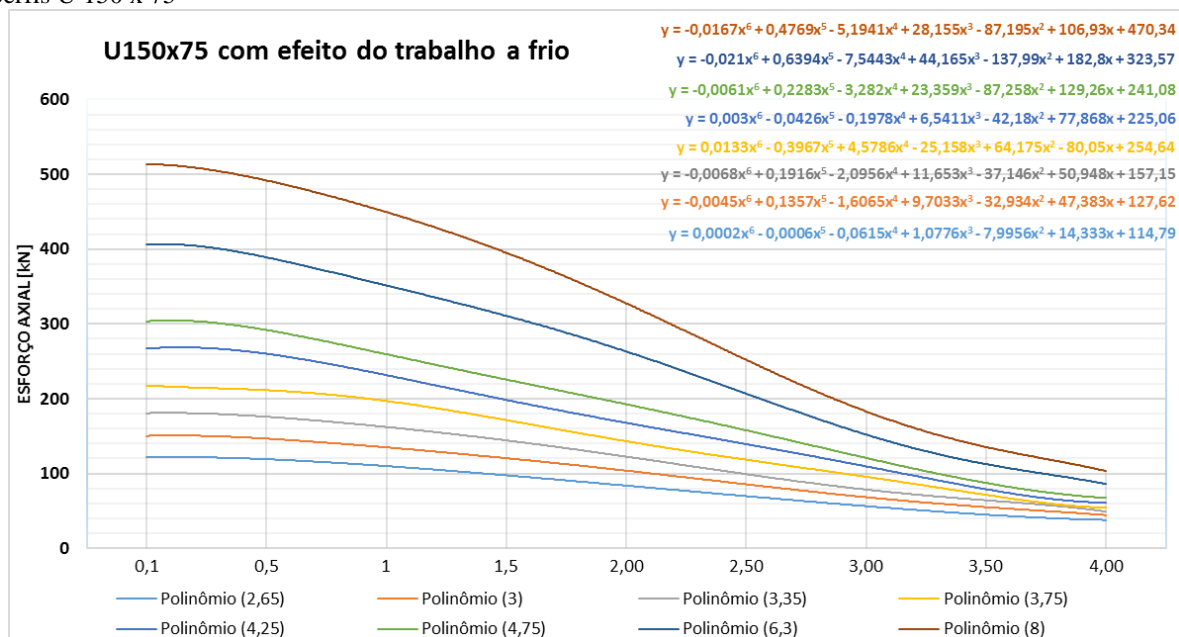
Fonte: O autor.

Gráfico C. 17 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 150 x 75



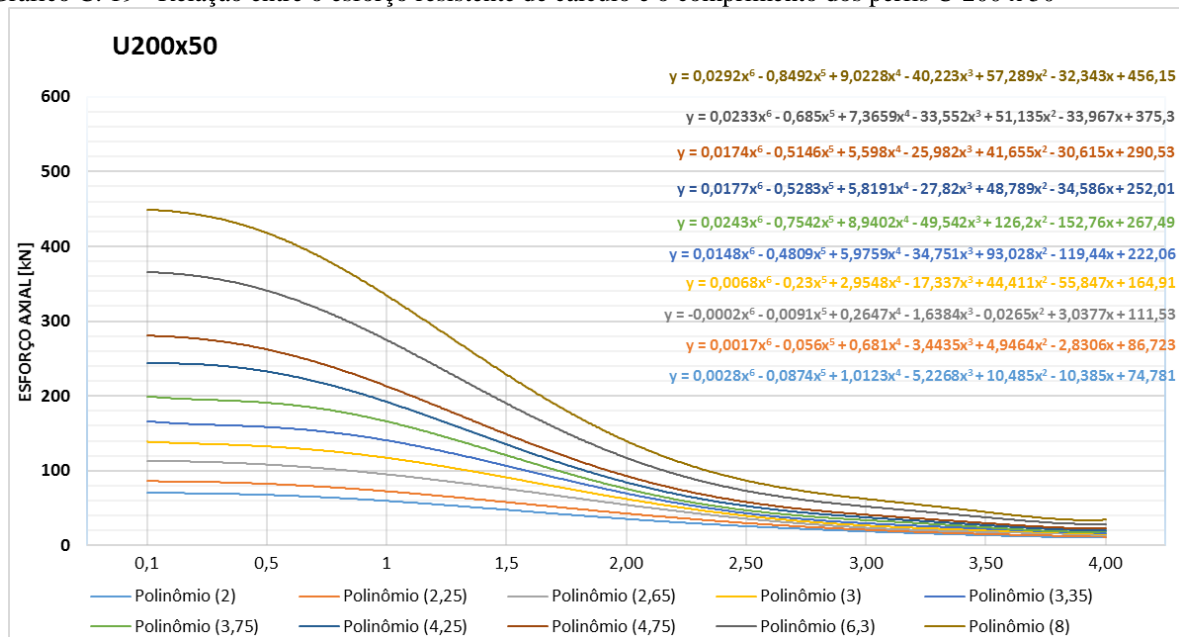
Fonte: O autor.

Gráfico C. 18 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 150 x 75



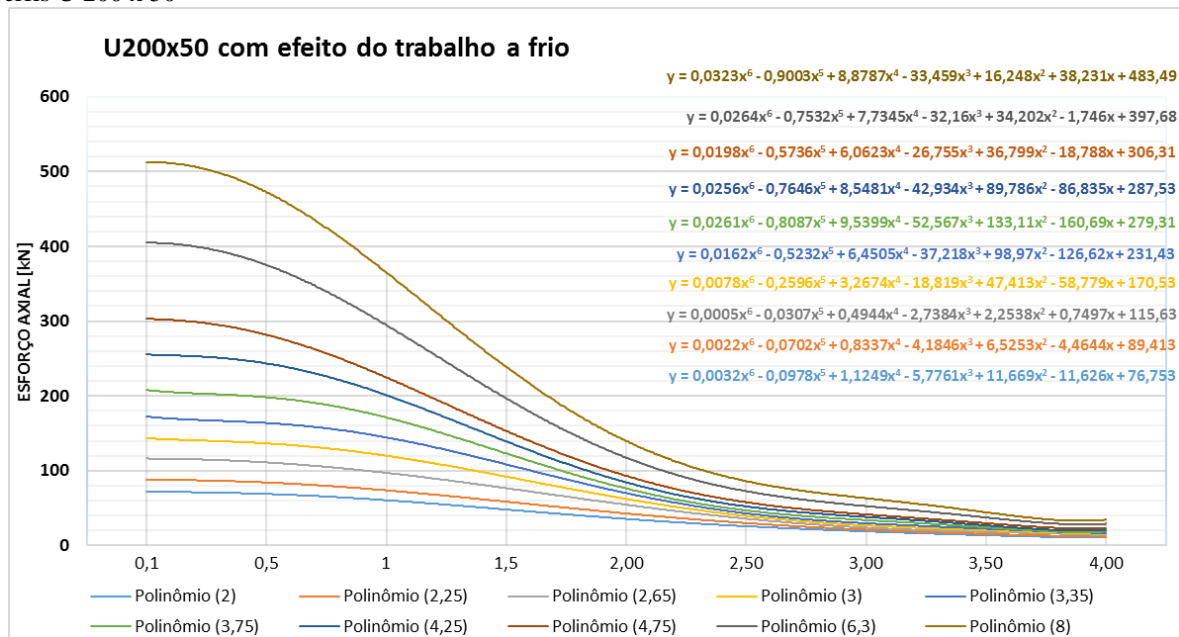
Fonte: O autor.

Gráfico C. 19 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 200 x 50



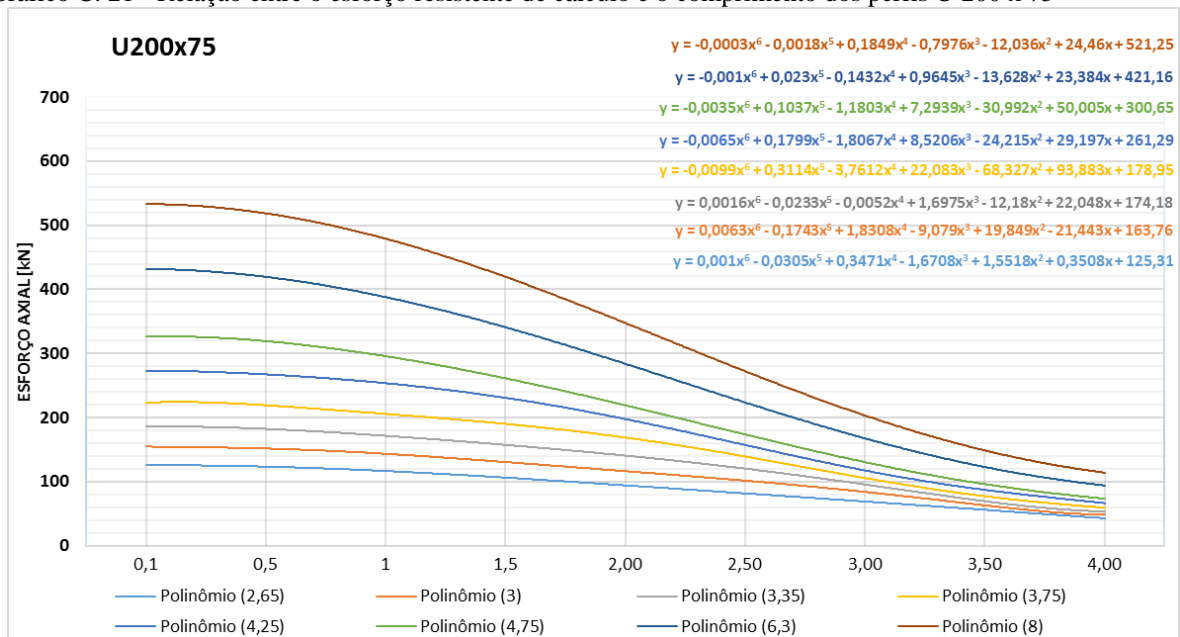
Fonte: O autor.

Gráfico C. 20 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 200 x 50



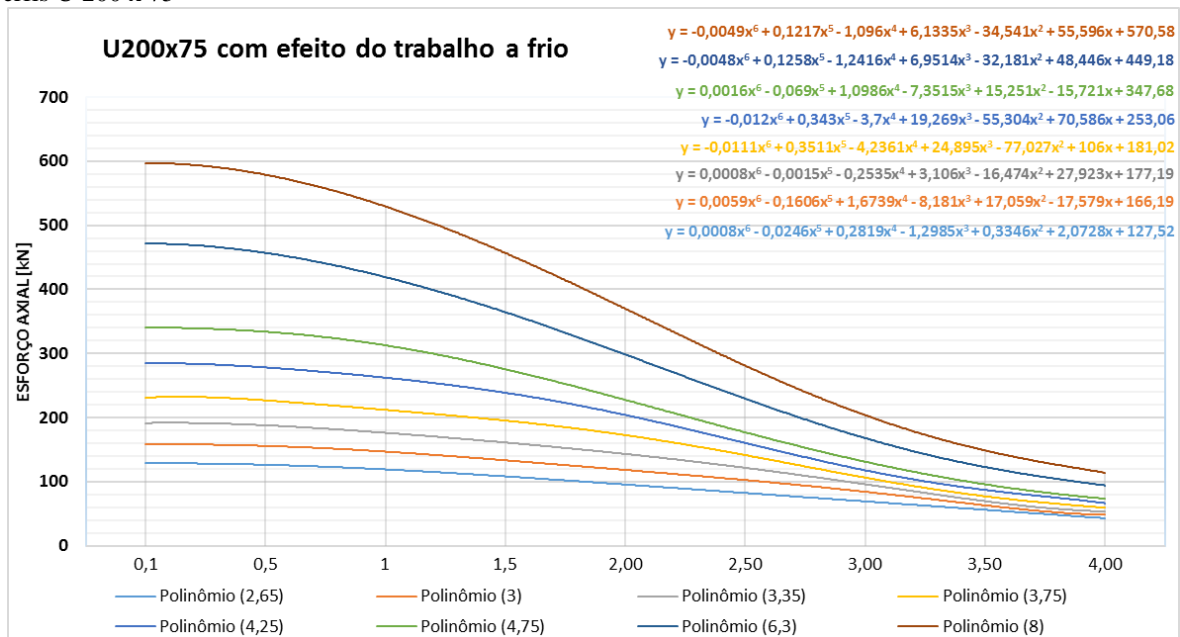
Fonte: O autor.

Gráfico C. 21 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 200 x 75



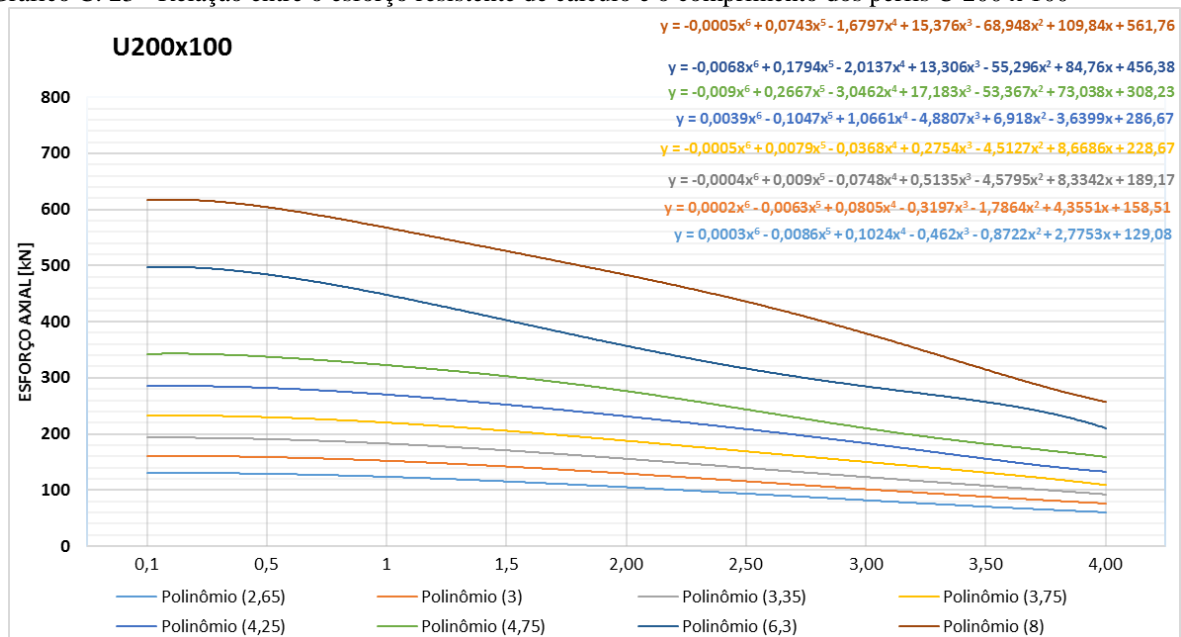
Fonte: O autor.

Gráfico C. 22 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 200 x 75



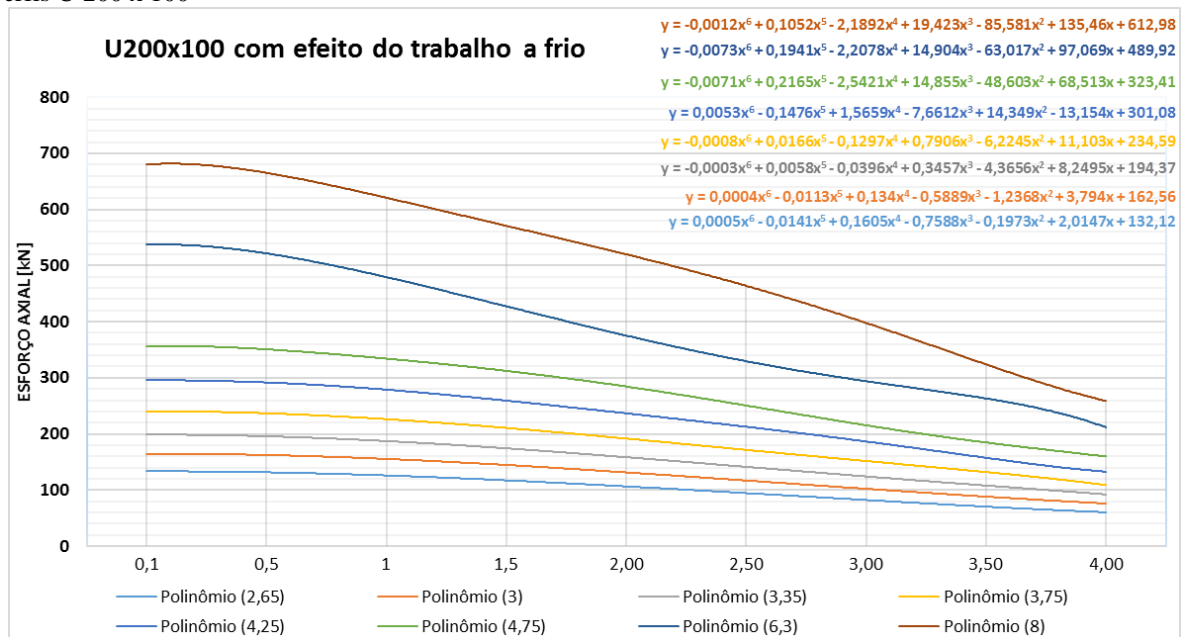
Fonte: O autor.

Gráfico C. 23 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 200 x 100



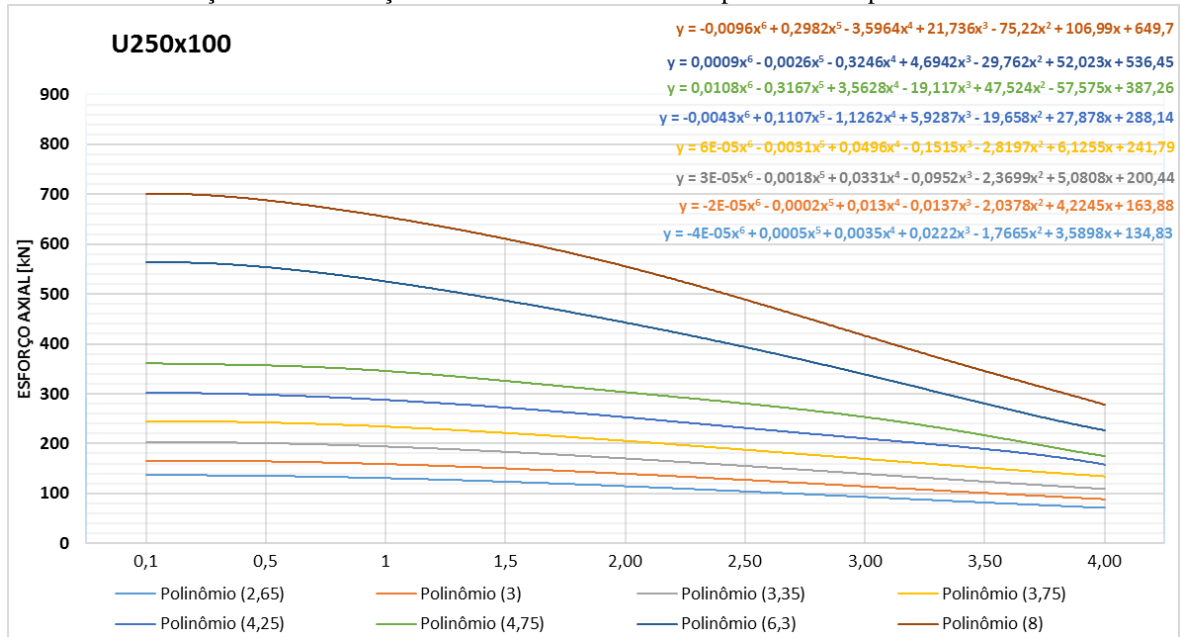
Fonte: O autor.

Gráfico C. 24 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 200 x 100



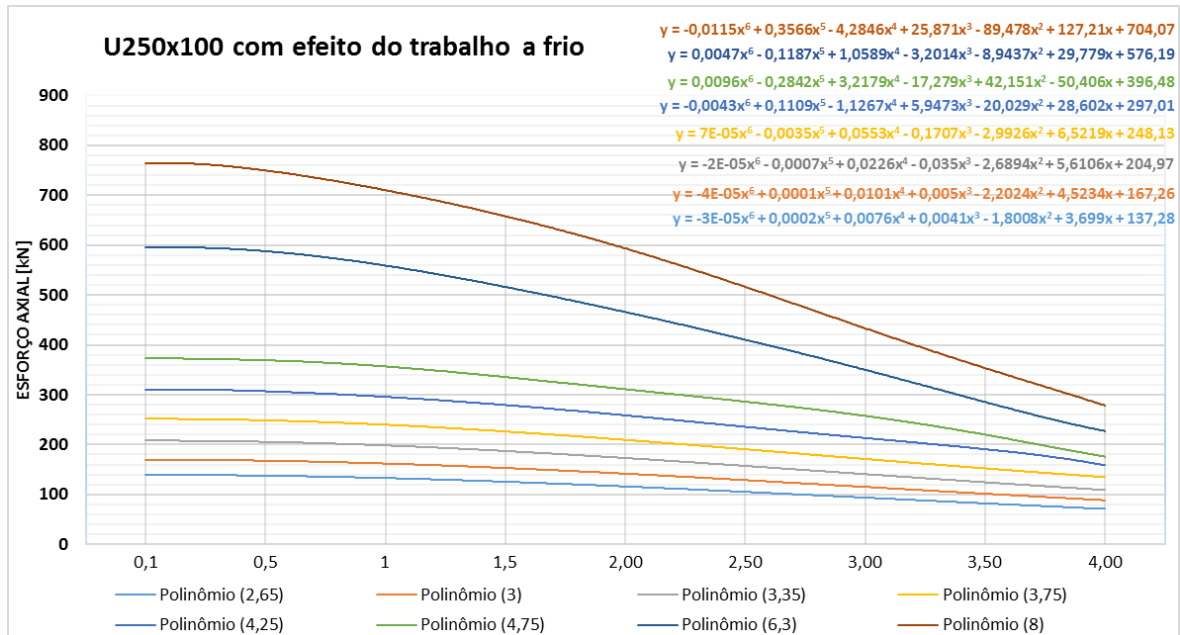
Fonte: O autor.

Gráfico C. 25 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 250 x 100



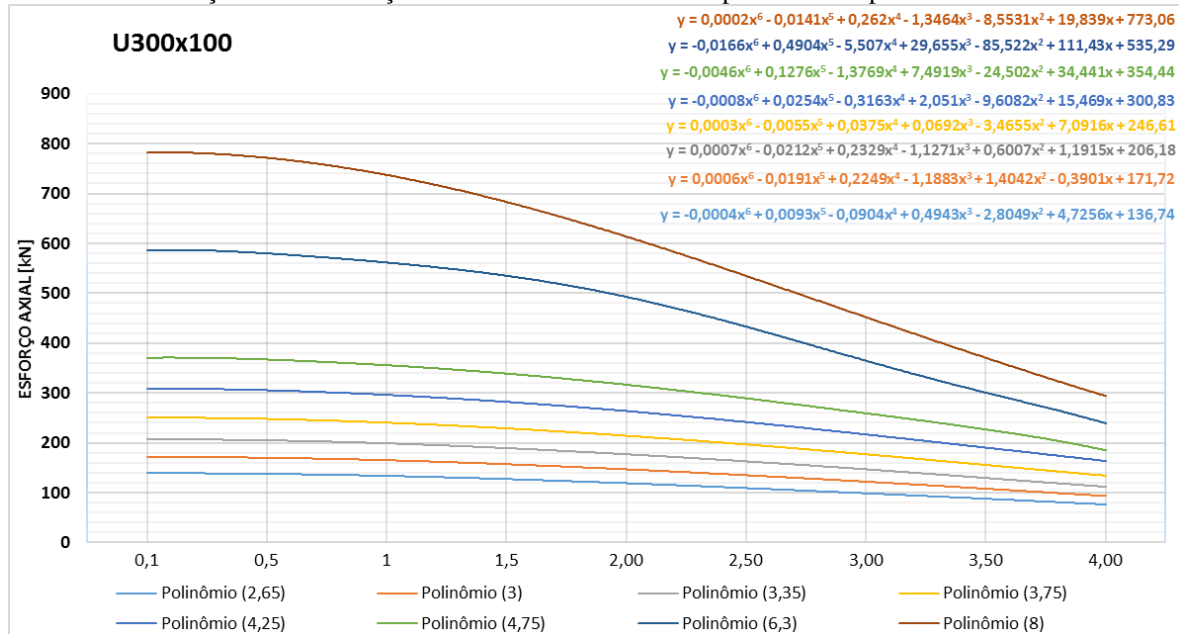
Fonte: O autor.

Gráfico C. 26 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 250 x 100



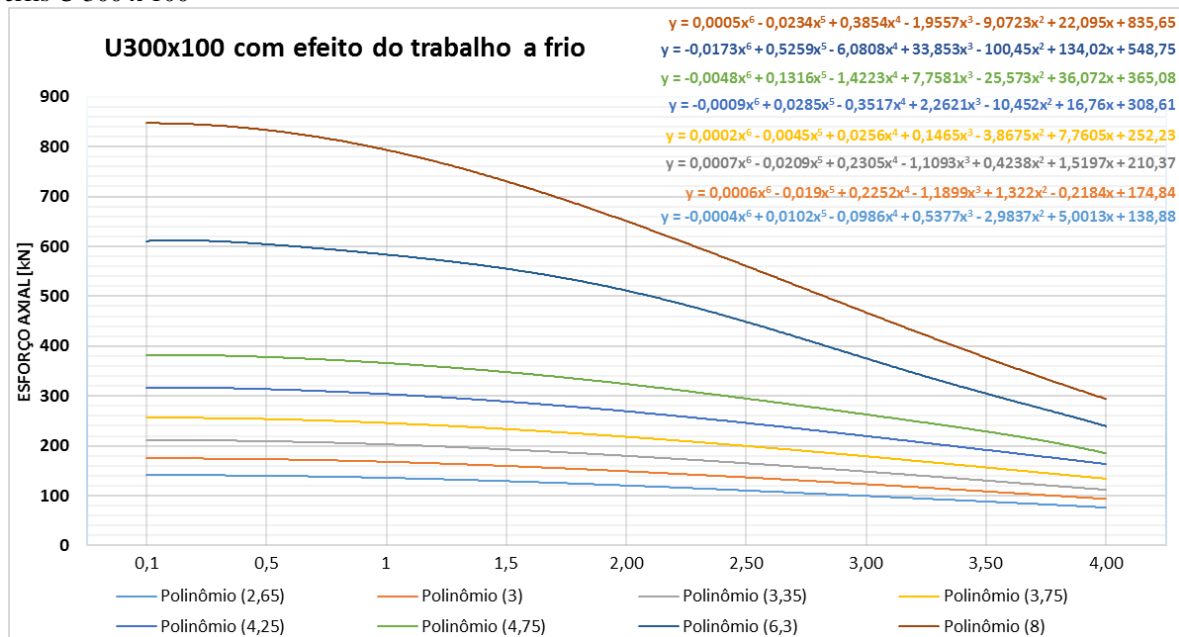
Fonte: O autor.

Gráfico C. 27 - Relação entre o esforço resistente de cálculo e o comprimento dos perfis U 300 x 100



Fonte: O autor.

Gráfico C. 28 - Relação entre o esforço resistente de cálculo com efeito do trabalho a frio e o comprimento dos perfis U 300 x 100



Fonte: O autor.

APÊNDICE D – IMAGENS DO ENSAIO DE METALOGRAFIA DE CHAPA DE AÇO CARBONO CST COR 400 COM DOBRA DE 90°

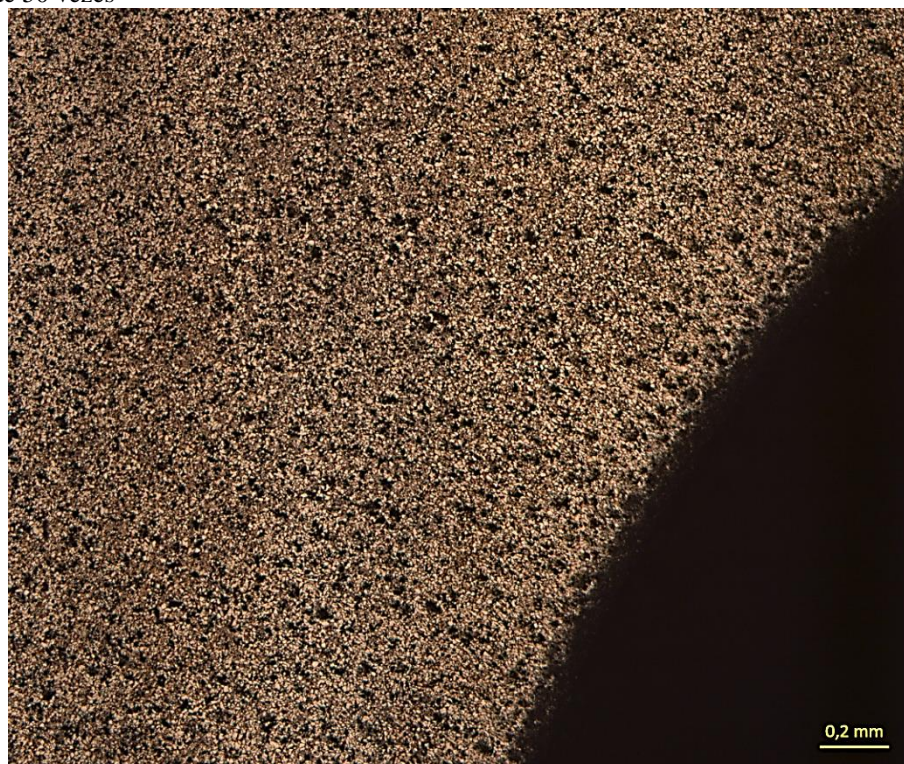
Esta seção irá apresentar todas as imagens obtidas na análise metalográfica para as seis regiões definidas neste trabalho. Cada região foi registrada com as aproximações de 25, 50, 100, 200, 500 e 1000 vezes. Nas aproximações de 500 e 1000 vezes foram desenhadas as linhas de interceptação dos contornos de grão e os respectivos números de interceptações identificados.

Figura D. 1 - Imagem metalográfica da região 1 - porção interna da dobra - aproximação de 25 vezes



Fonte: O autor.

Figura D. 2 - Imagem metalográfica da região 1 - porção interna da dobra - aproximação de 50 vezes



Fonte: O autor.

Figura D. 3 - Imagem metalográfica da região 1 - porção interna da dobra - aproximação de 100 vezes



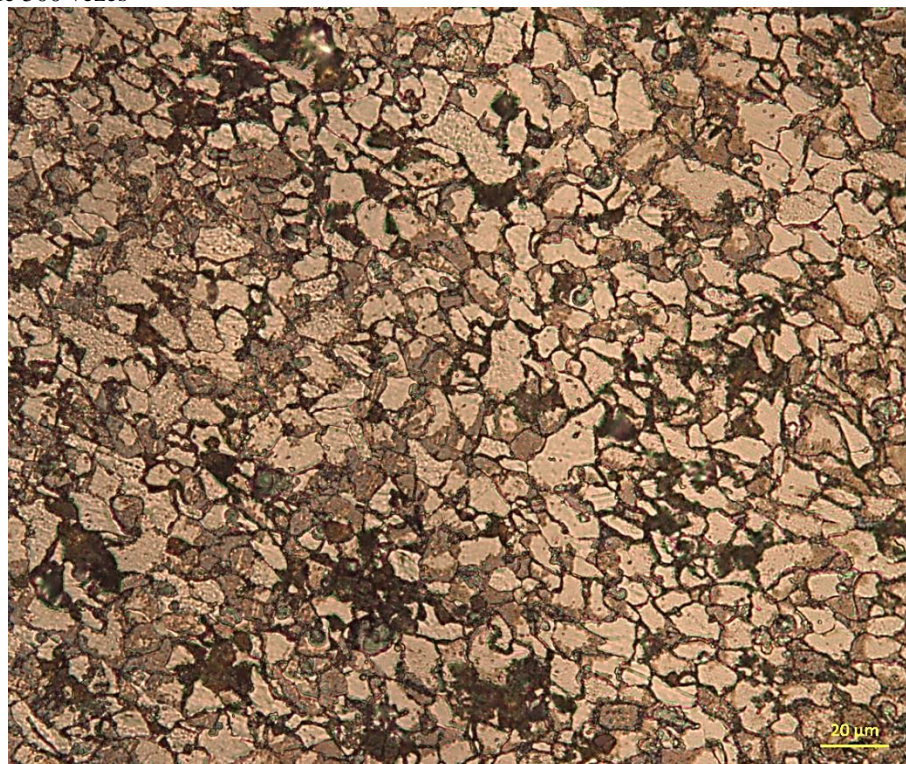
Fonte: O autor.

Figura D. 4 - Imagem metalográfica da região 1 - porção interna da dobra - aproximação de 200 vezes



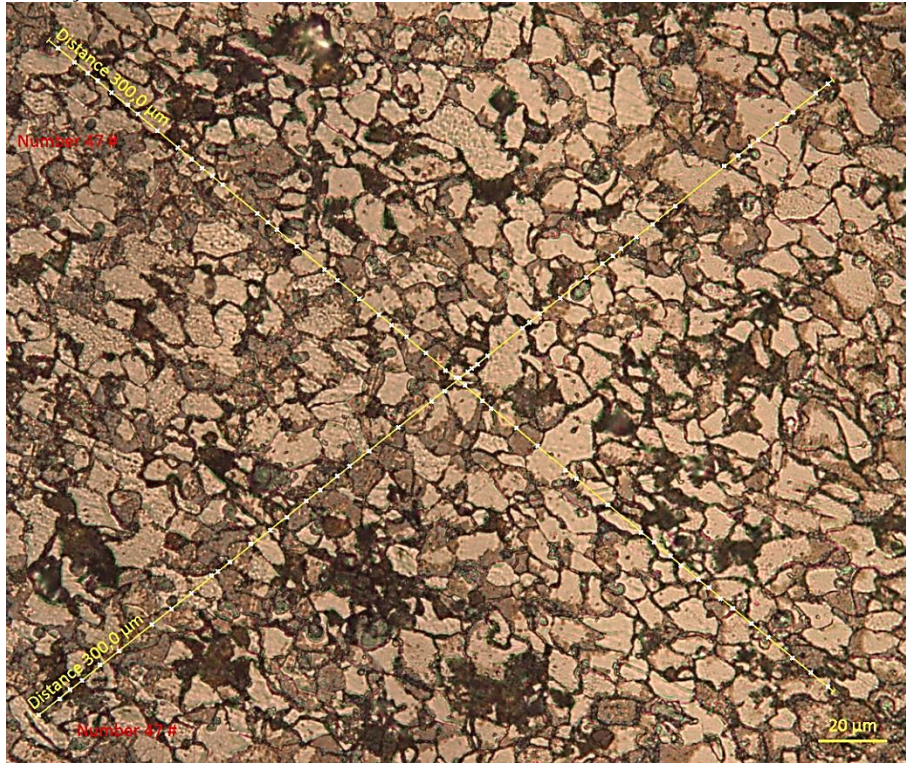
Fonte: O autor.

Figura D. 5 - Imagem metalográfica da região 1 - porção interna da dobra - aproximação de 500 vezes



Fonte: O autor.

Figura D. 6 - Imagem metalográfica com marcações da região 1 - porção interna da dobra - aproximação de 500 vezes



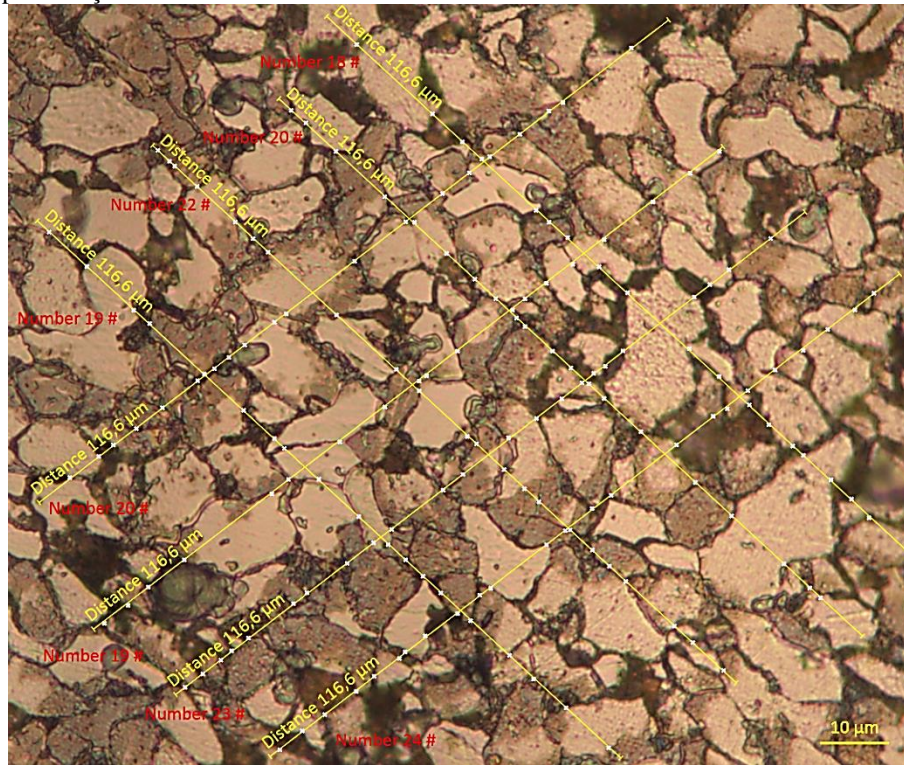
Fonte: O autor.

Figura D. 7 - Imagem metalográfica da região 1 - porção interna da dobra - aproximação de 1000 vezes



Fonte: O autor.

Figura D. 8 - Imagem metalográfica com marcações da região 1 - porção interna da dobra - aproximação de 1000 vezes



Fonte: O autor.

Figura D. 9 - Imagem metalográfica da região 2 - porção mediana da dobra - aproximação de 25 vezes



Fonte: O autor.

Figura D. 10 - Imagem metalográfica da região 2 - porção mediana da dobra - aproximação de 50 vezes



Fonte: O autor.

Figura D. 11 - Imagem metalográfica da região 2 - porção mediana da dobra - aproximação de 100 vezes



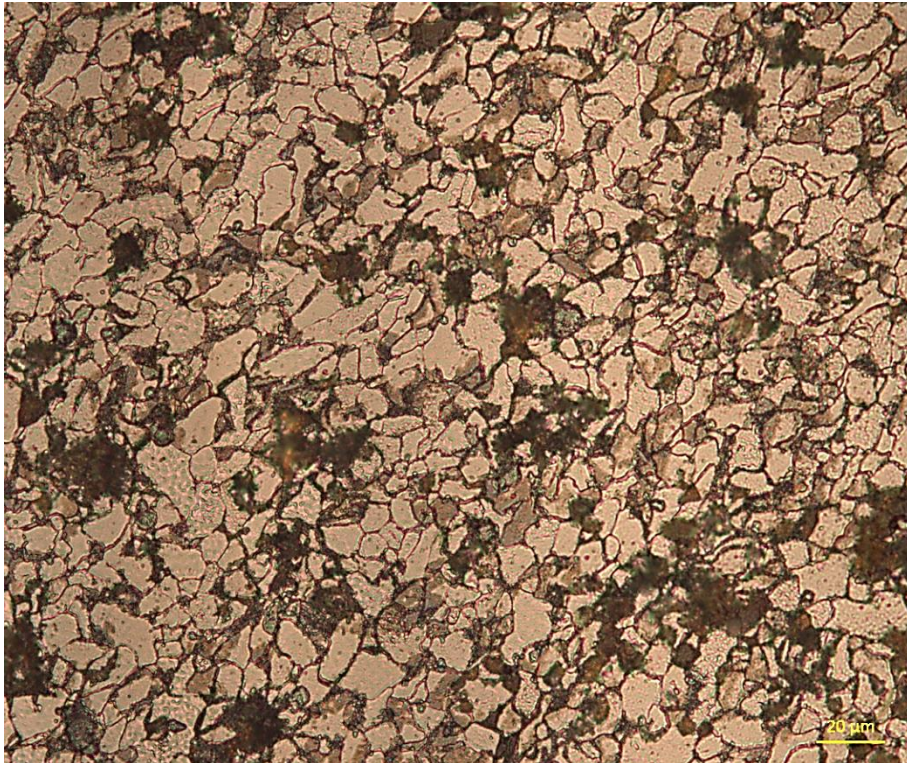
Fonte: O autor.

Figura D. 12 - Imagem metalográfica da região 2 - porção mediana da dobra - aproximação de 200 vezes



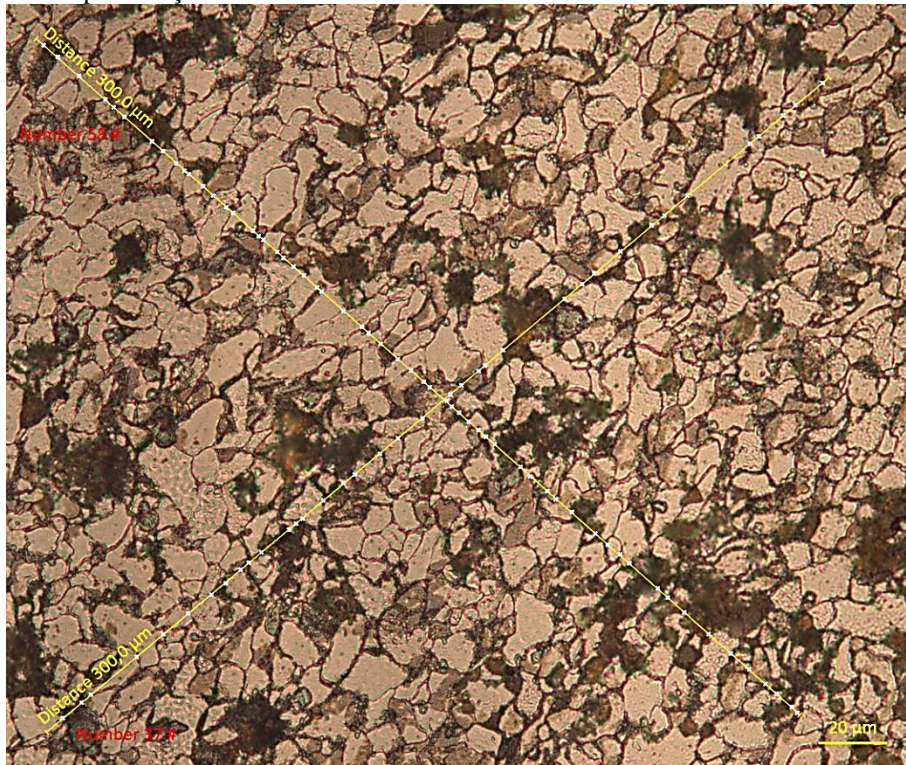
Fonte: O autor.

Figura D. 13 - Imagem metalográfica da região 2 - porção mediana da dobra - aproximação de 500 vezes



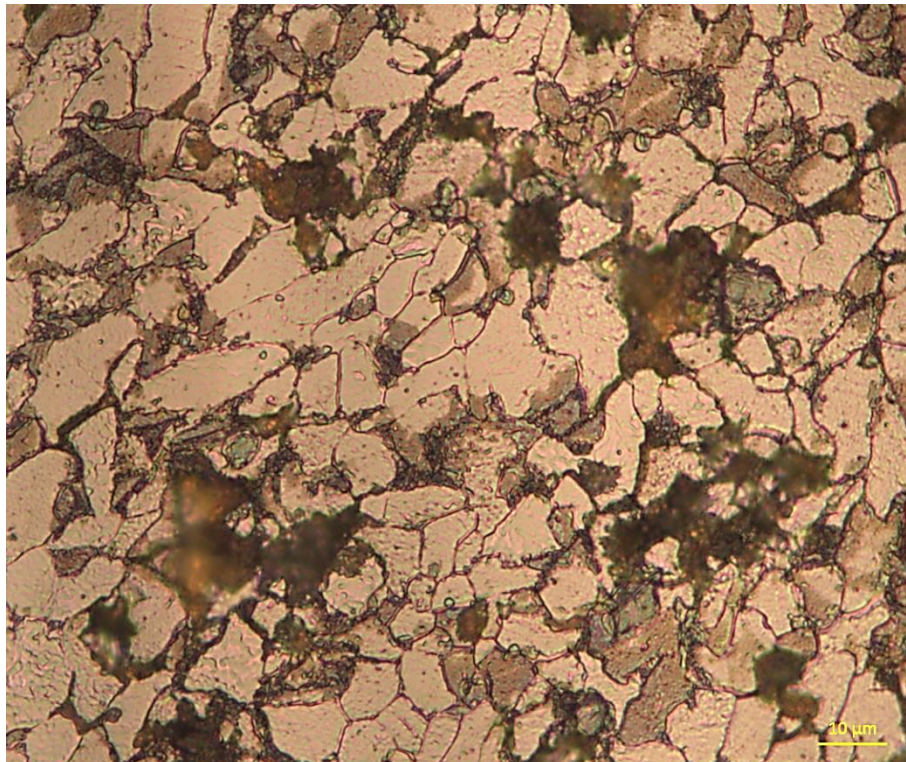
Fonte: O autor.

Figura D. 14 - Imagem metalográfica com marcações da região 2 - porção mediana da dobra - aproximação de 500 vezes.



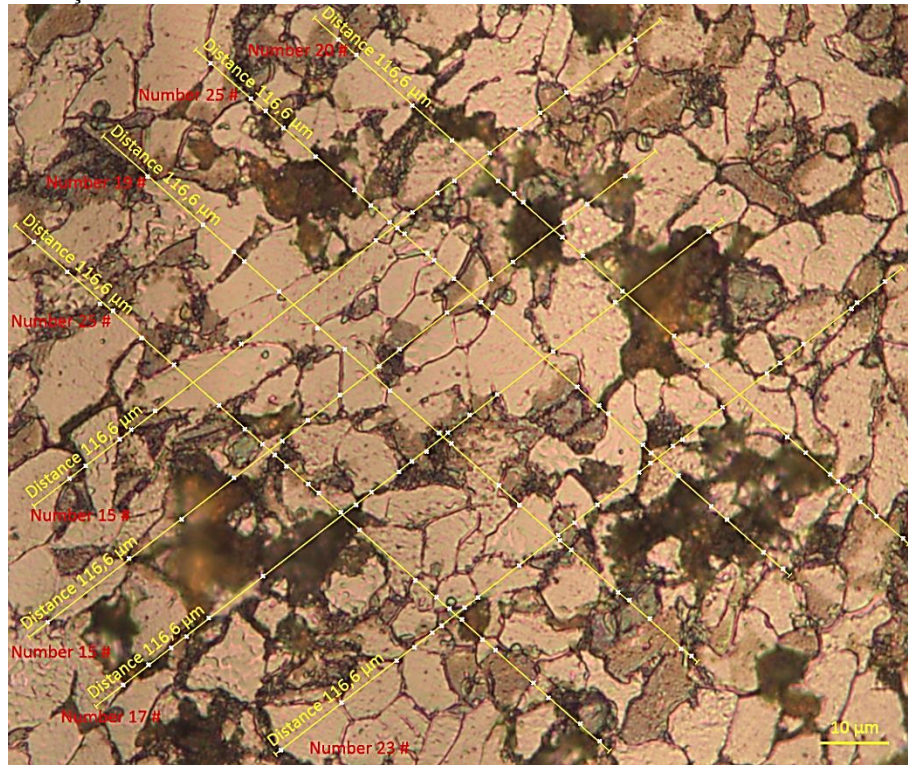
Fonte: O autor.

Figura D. 15 - Imagem metalográfica da região 2 - porção mediana da dobra - aproximação de 1000 vezes



Fonte: O autor.

Figura D. 16 - Imagem metalográfica com marcações da região 2 - porção mediana da dobra - aproximação de 1000 vezes



Fonte: O autor.

Figura D. 17 - Imagem metalográfica da região 3 - porção externa da dobra - aproximação de 25 vezes



Fonte: O autor.

Figura D. 18 - Imagem metalográfica da região 3 - porção externa da dobra - aproximação de 50 vezes



Fonte: O autor.

Figura D. 19 - Imagem metalográfica da região 3 - porção externa da dobra - aproximação de 100 vezes



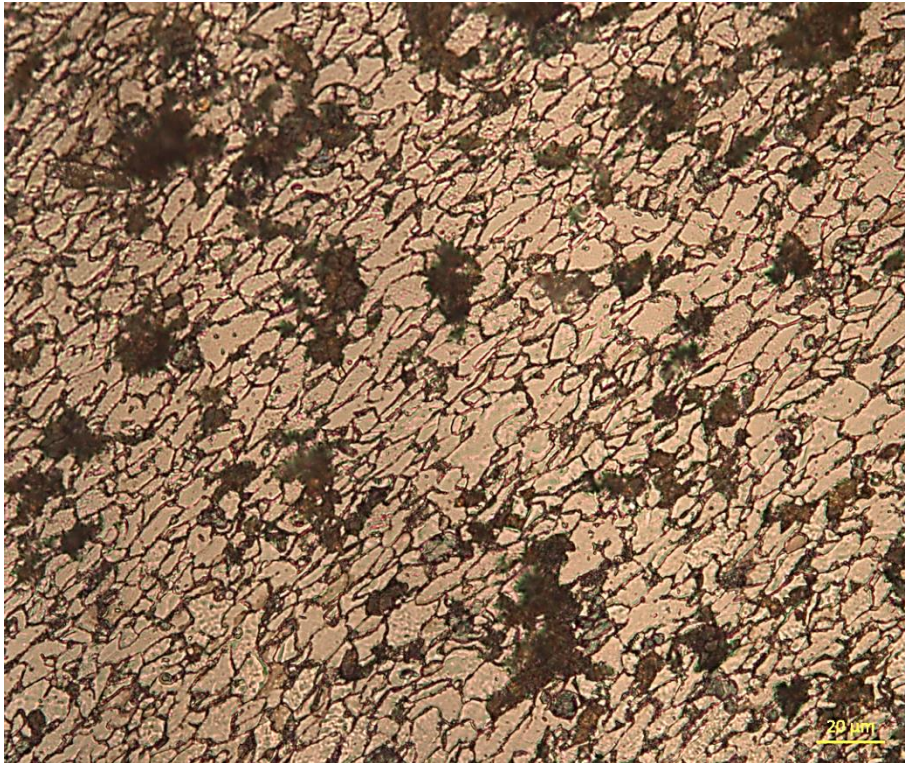
Fonte: O autor.

Figura D. 20 - Imagem metalográfica da região 3 - porção externa da dobra - aproximação de 200 vezes



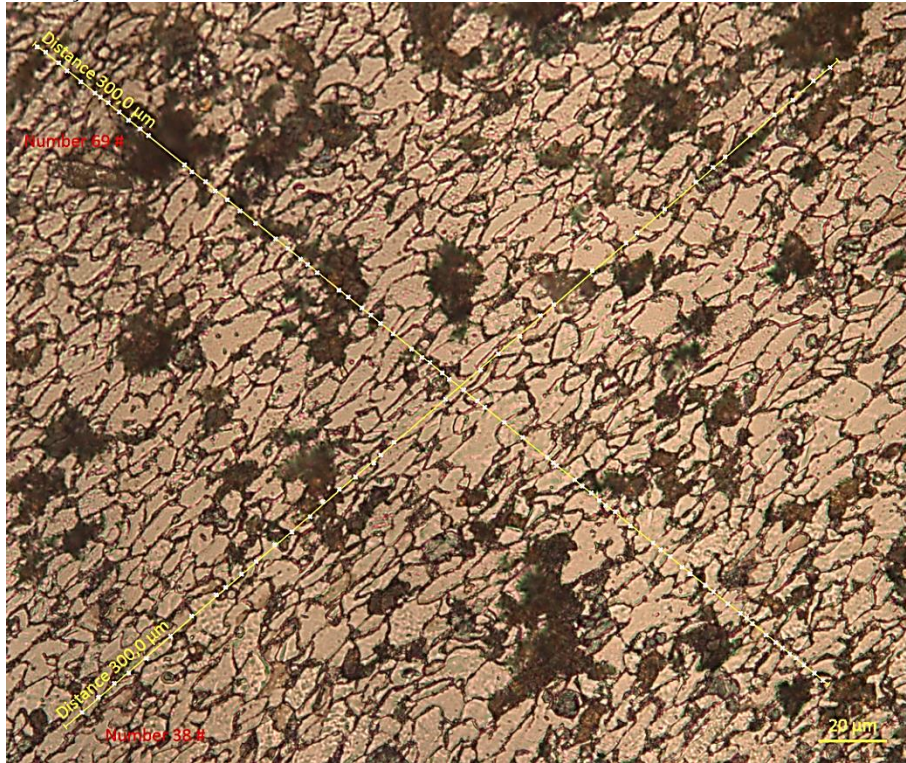
Fonte: O autor.

Figura D. 21 - Imagem metalográfica da região 3 - porção externa da dobra - aproximação de 500 vezes



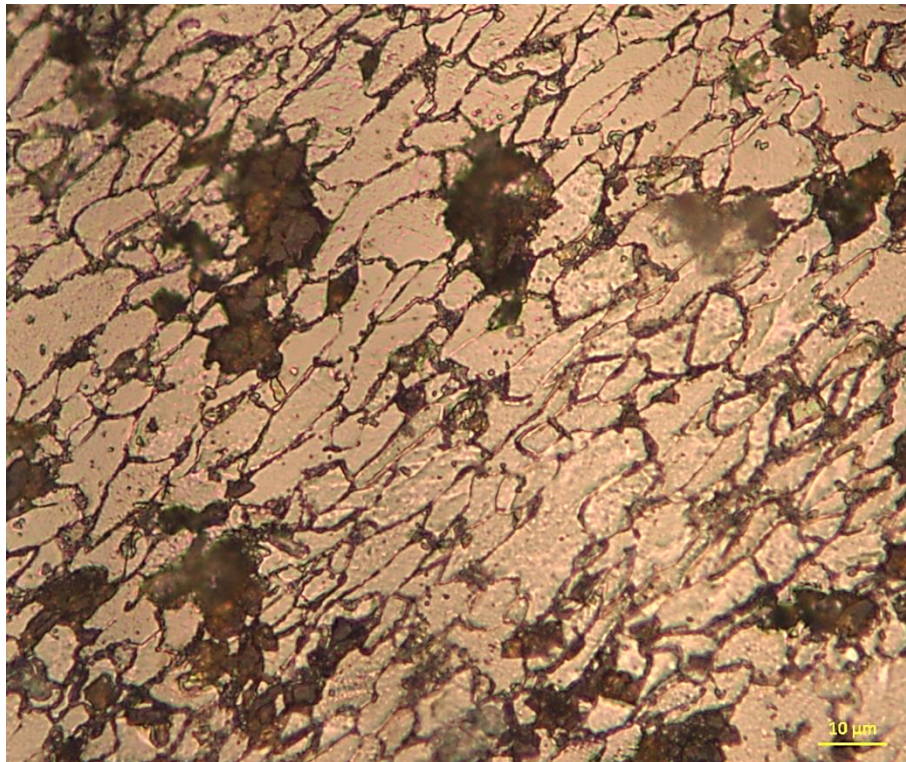
Fonte: O autor.

Figura D. 22 - Imagem metalográfica com marcações da região 3 - porção externa da dobra - aproximação de 500 vezes



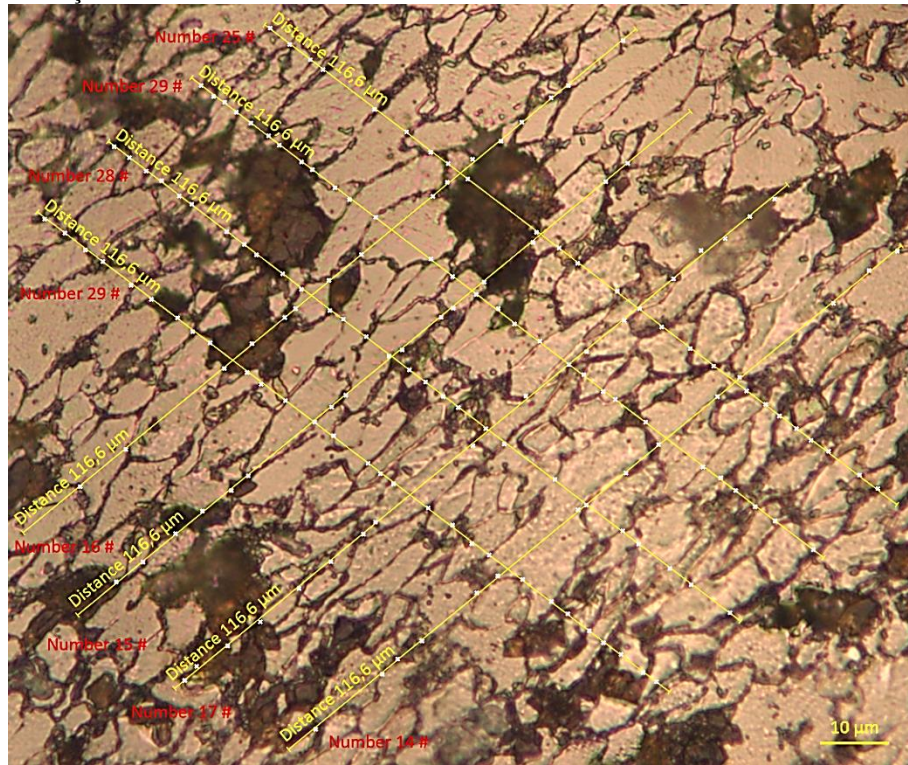
Fonte: O autor.

Figura D. 23 - Imagem metalográfica da região 3 - porção externa da dobra - aproximação de 1000 vezes



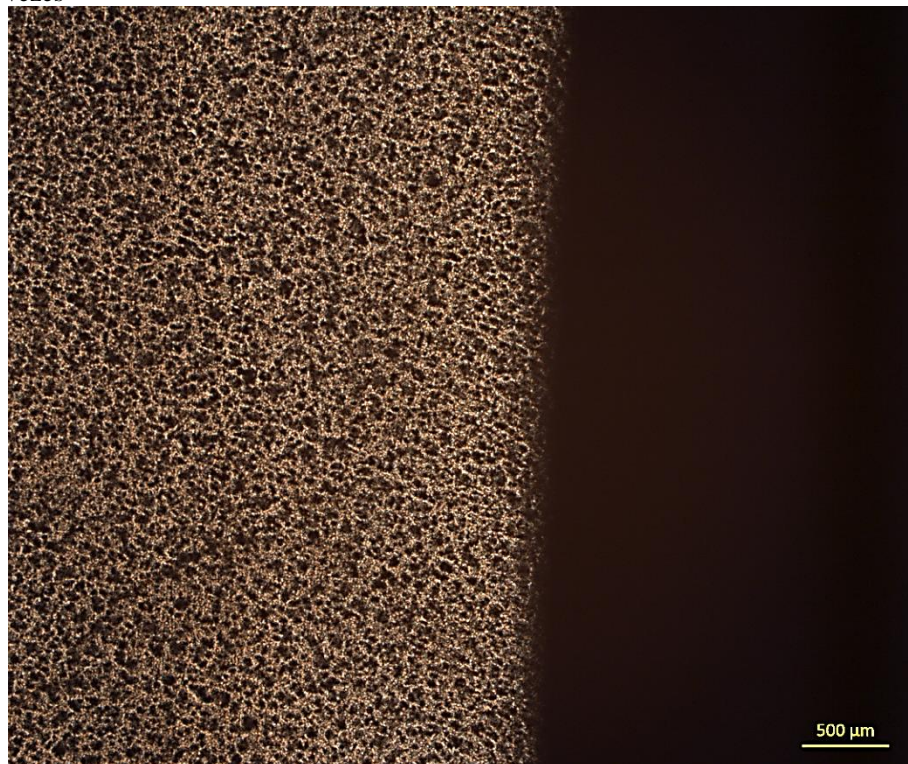
Fonte: O autor.

Figura D. 24 - Imagem metalográfica com marcações da região 3 - porção externa da dobra - aproximação de 1000 vezes



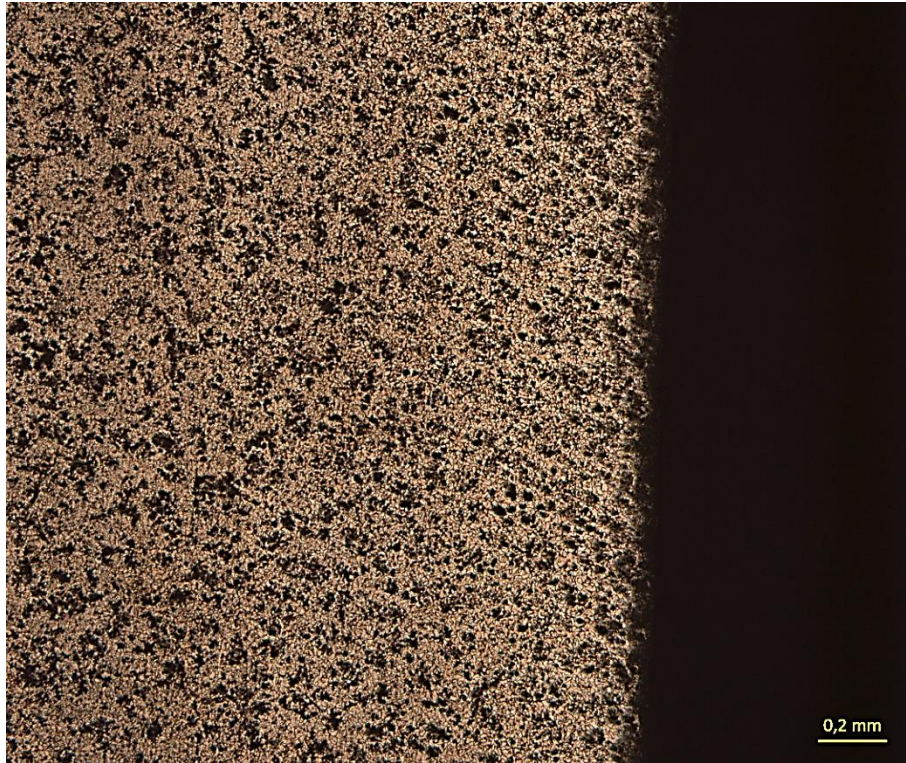
Fonte: O autor.

Figura D. 25 - Imagem metalográfica da região 4 - porção interna da chapa - aproximação de 25 vezes



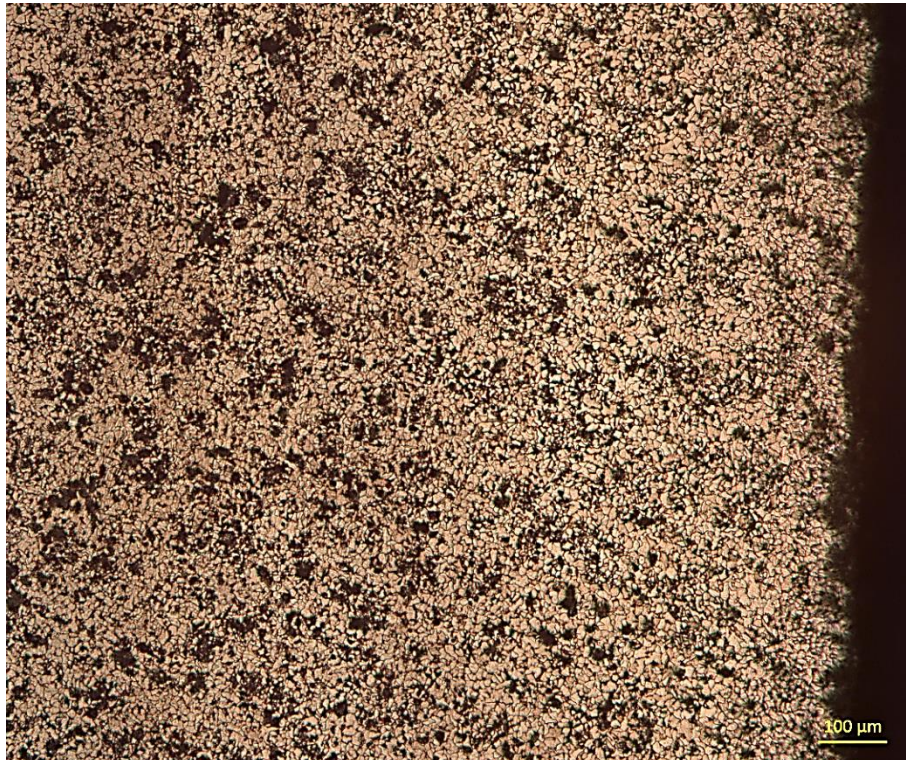
Fonte: O autor.

Figura D. 26 - Imagem metalográfica da região 4 - porção interna da chapa - aproximação de 50 vezes



Fonte: O autor.

Figura D. 27 - Imagem metalográfica da região 4 - porção interna da chapa - aproximação de 100 vezes



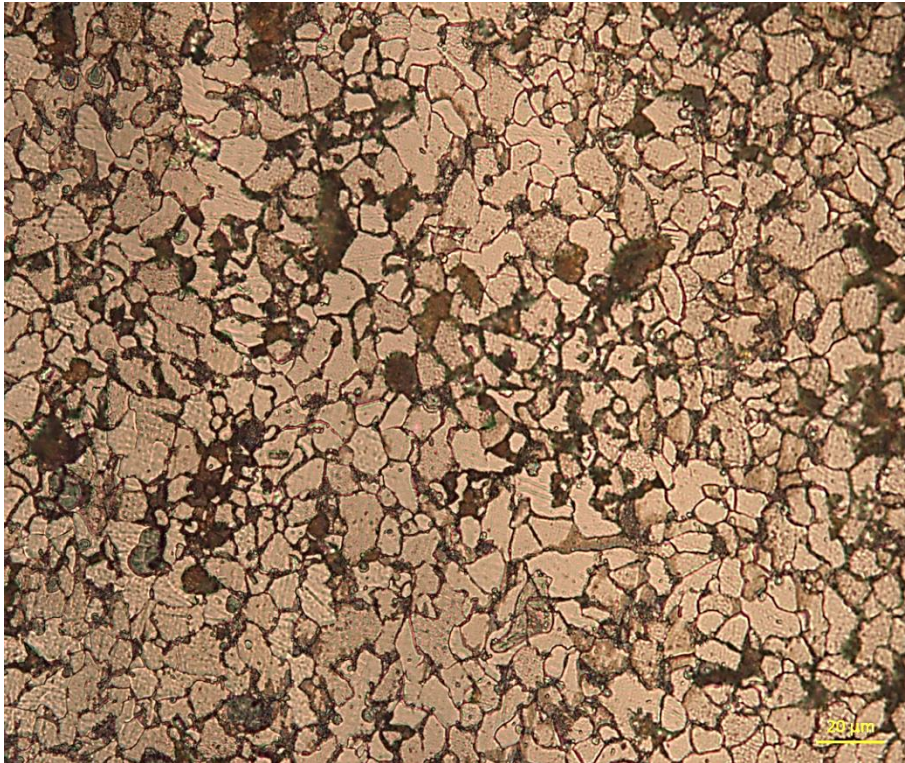
Fonte: O autor.

Figura D. 28 - Imagem metalográfica da região 4 - porção interna da chapa - aproximação de 200 vezes



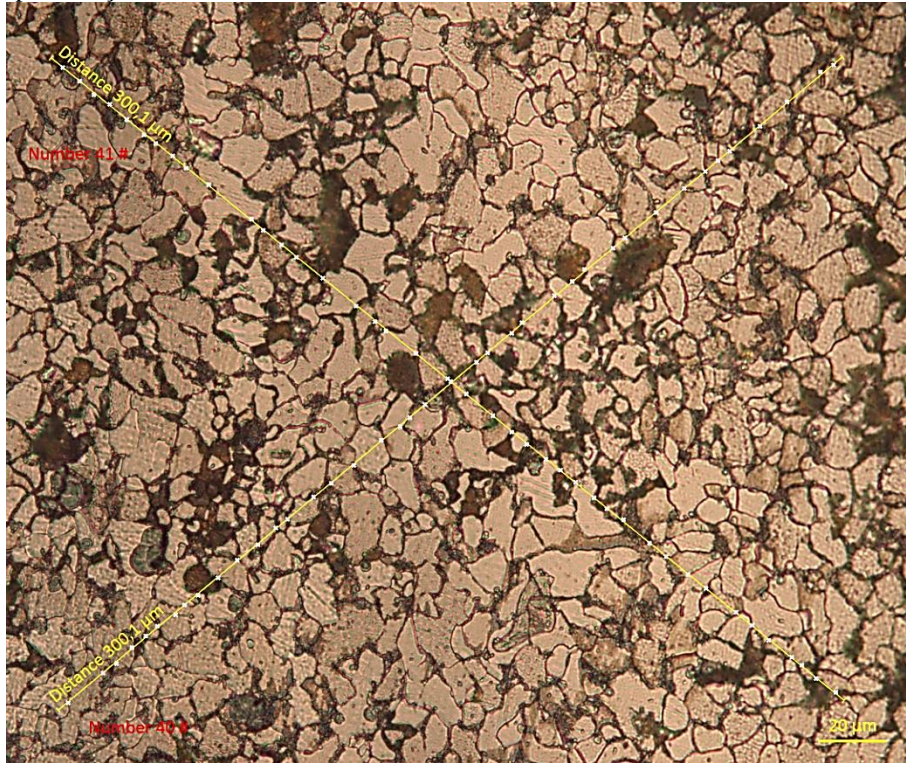
Fonte: O autor.

Figura D. 29 - Imagem metalográfica da região 4 - porção interna da chapa - aproximação de 500 vezes



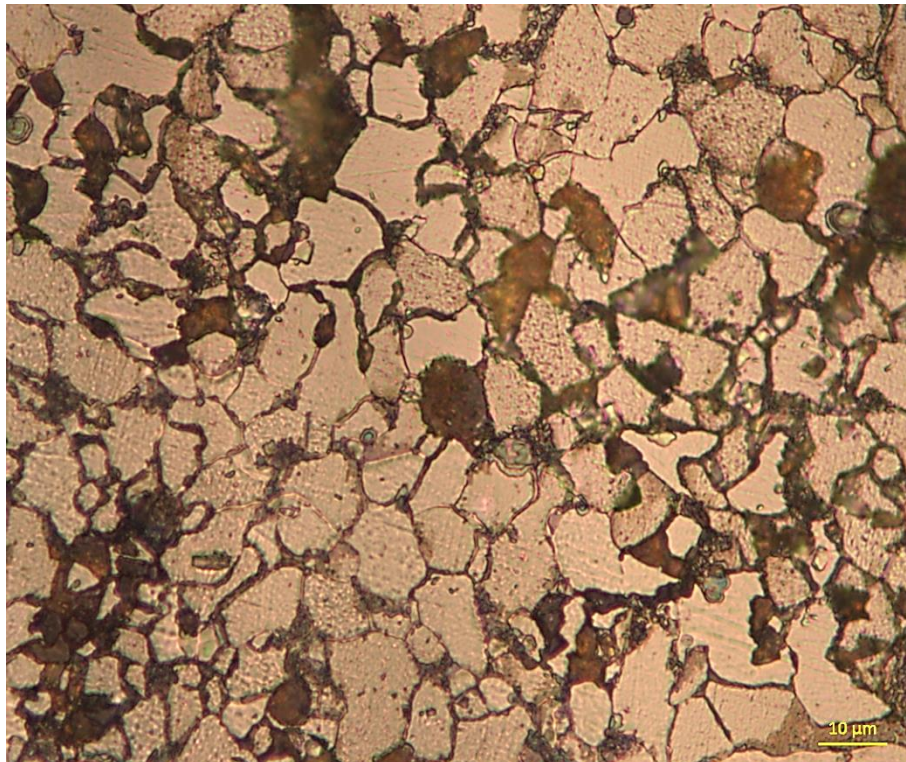
Fonte: O autor.

Figura D. 30 - Imagem metalográfica com marcações da região 4 - porção interna da chapa - aproximação de 500 vezes



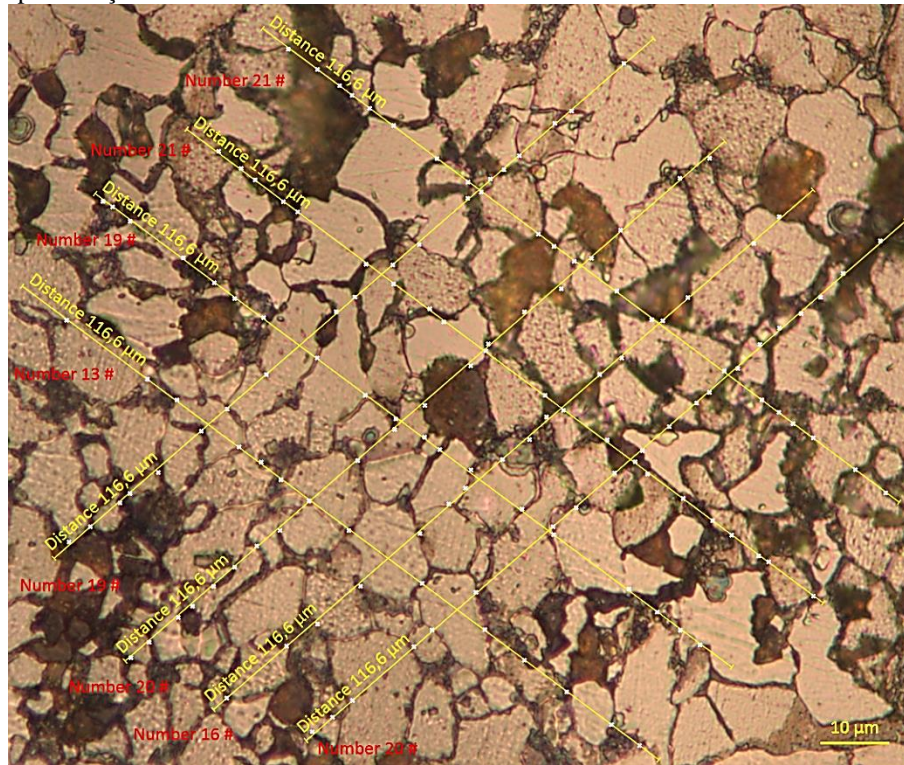
Fonte: O autor.

Figura D. 31 - Imagem metalográfica da região 4 - porção interna da chapa - aproximação de 1000 vezes



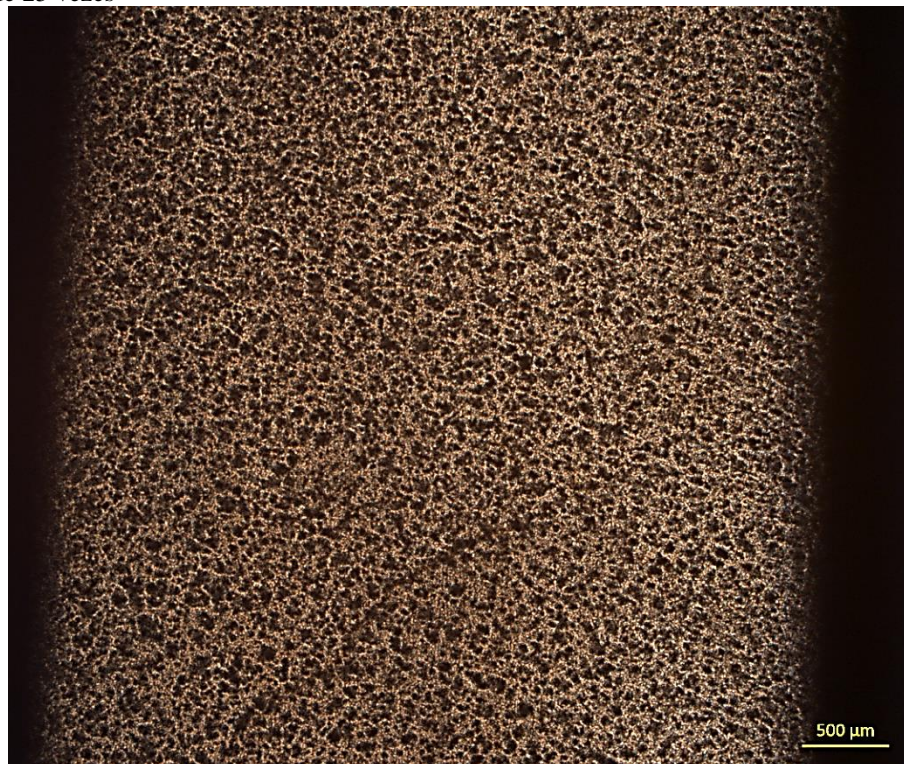
Fonte: O autor.

Figura D. 32 - Imagem metalográfica com marcações da região 4 - porção interna da chapa - aproximação de 1000 vezes



Fonte: O autor.

Figura D. 33 - Imagem metalográfica da região 5 - porção mediana da chapa - aproximação de 25 vezes



Fonte: O autor.

Figura D. 34 - Imagem metalográfica da região 5 - porção mediana da chapa - aproximação de 50 vezes



Fonte: O autor.

Figura D. 35 - Imagem metalográfica da região 5 - porção mediana da chapa - aproximação de 100 vezes



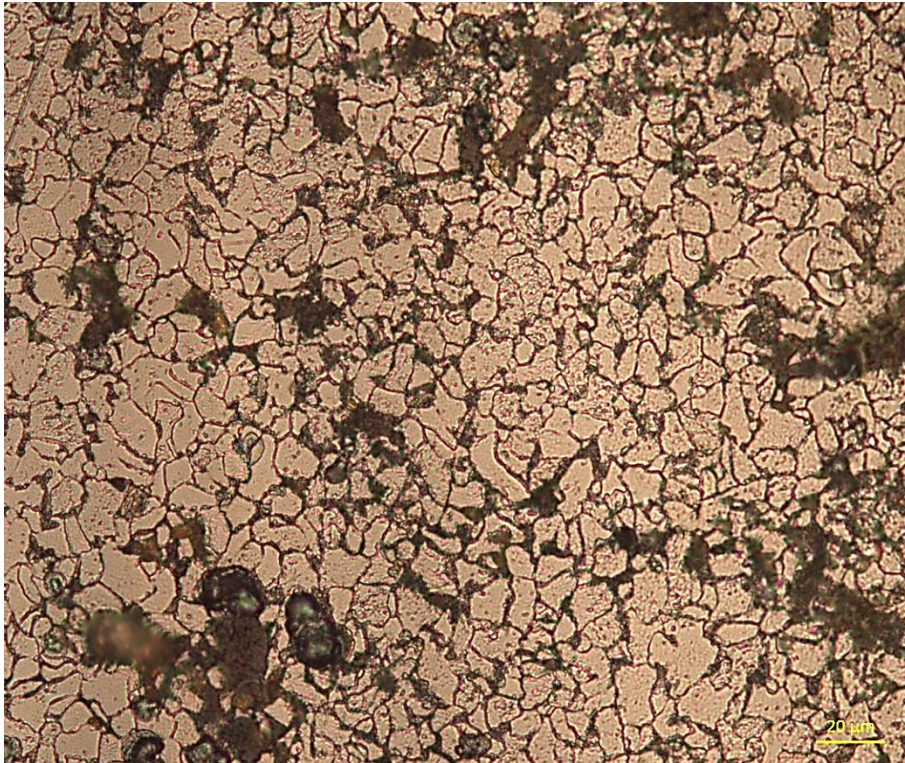
Fonte: O autor.

Figura D. 36 - Imagem metalográfica da região 5 - porção mediana da chapa - aproximação de 200 vezes



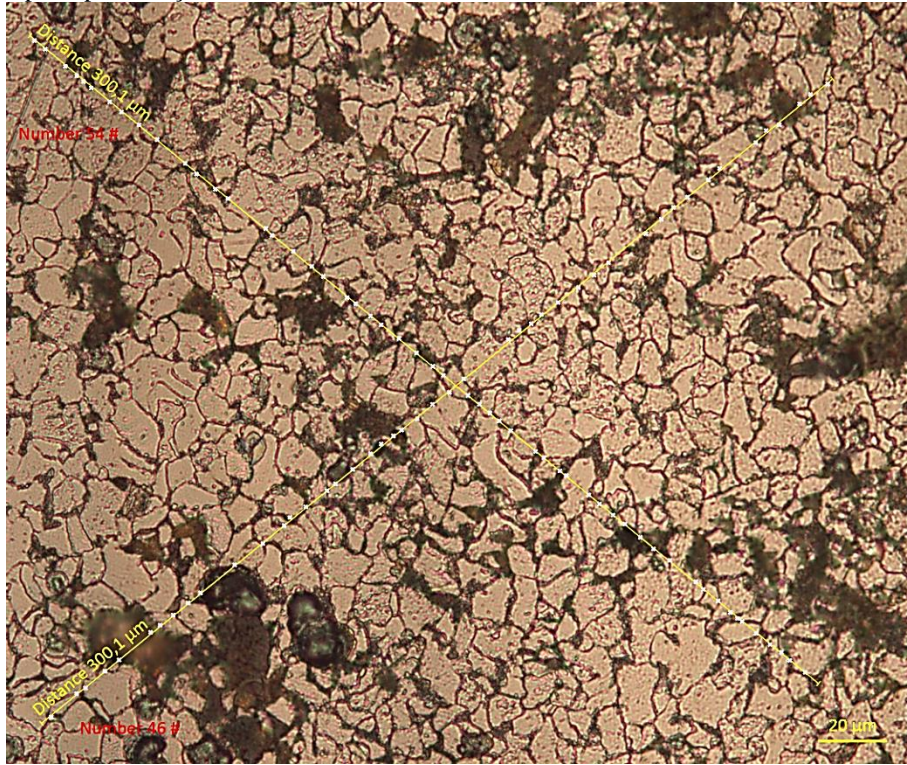
Fonte: O autor.

Figura D. 37 - Imagem metalográfica da região 5 - porção mediana da chapa - aproximação de 500 vezes



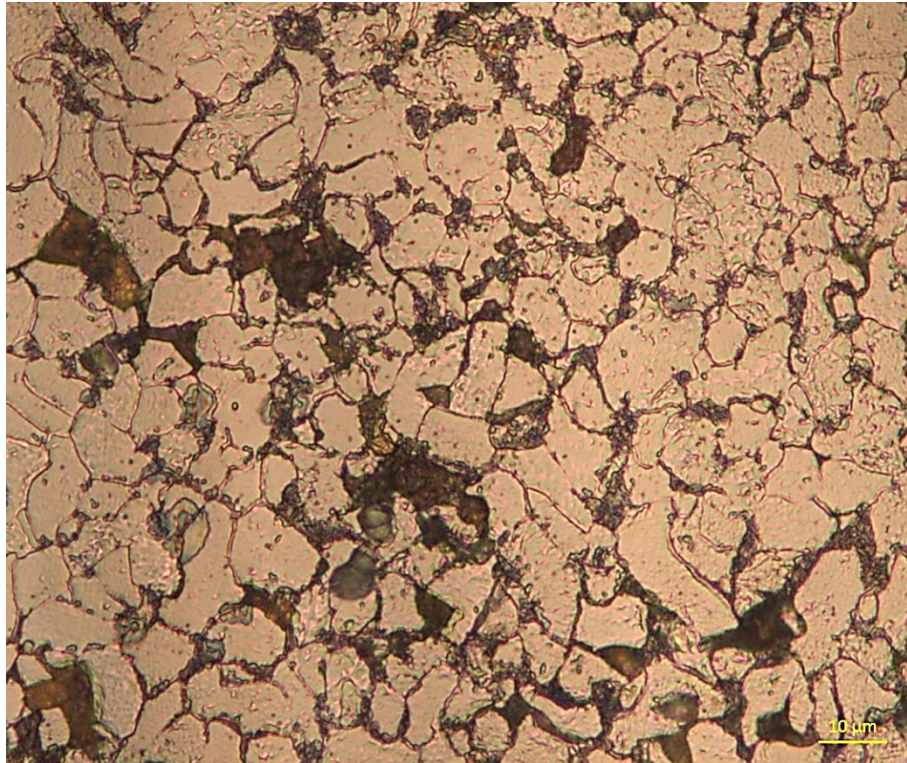
Fonte: O autor.

Figura D. 38 - Imagem metalográfica com marcações da região 5 - porção mediana da chapa - aproximação de 500 vezes



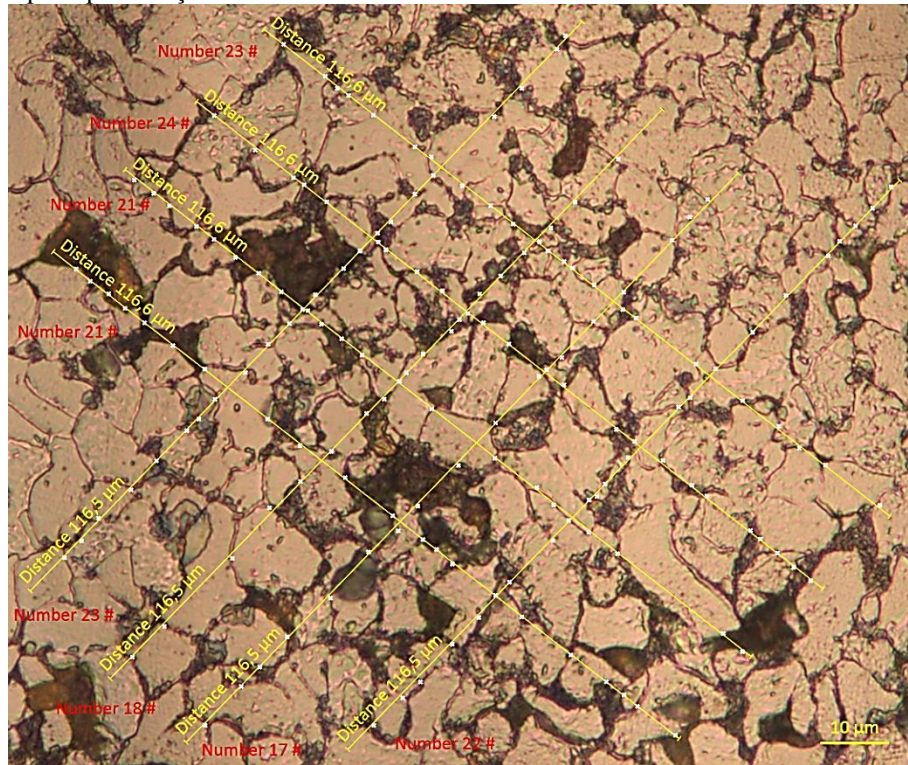
Fonte: O autor.

Figura D. 39 - Imagem metalográfica da região 5 - porção mediana da chapa - aproximação de 1000 vezes



Fonte: O autor.

Figura D. 40 - Imagem metalográfica com marcações da região 5 - porção mediana da chapa - aproximação de 1000 vezes



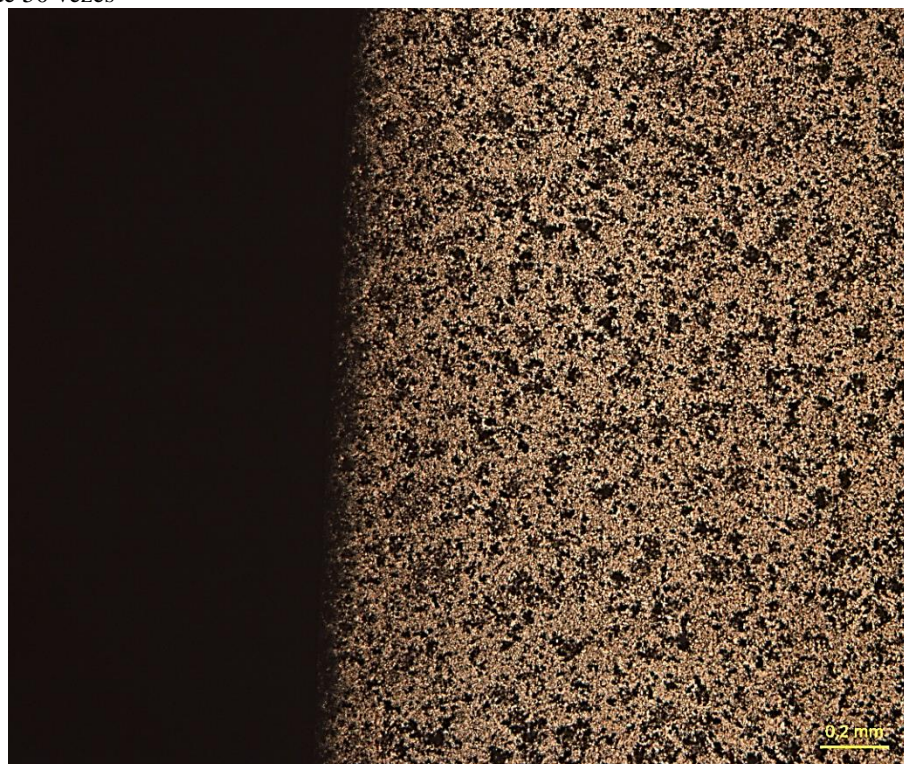
Fonte: O autor.

Figura D. 41 - Imagem metalográfica da região 6 - porção externa da chapa - aproximação de 25 vezes



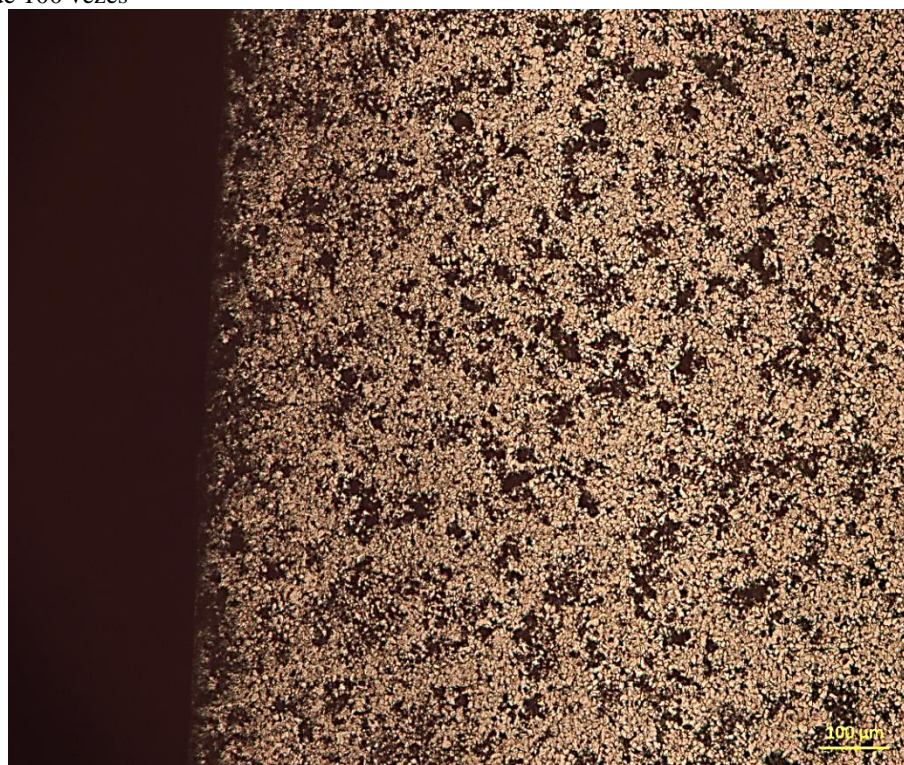
Fonte: O autor.

Figura D. 42 - Imagem metalográfica da região 6 - porção externa da chapa - aproximação de 50 vezes



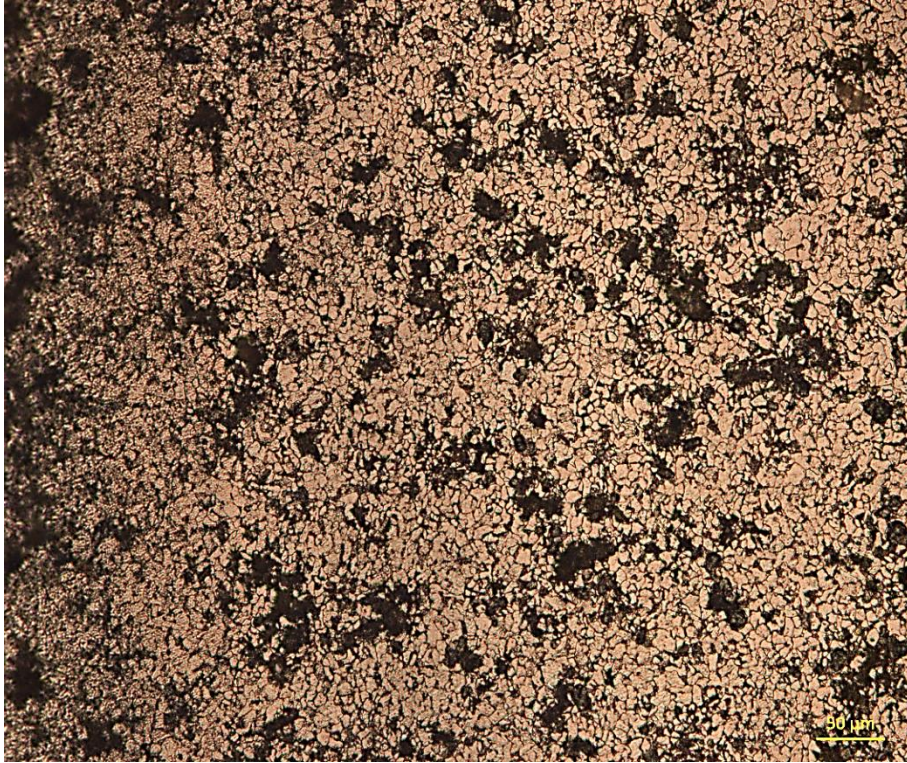
Fonte: O autor.

Figura D. 43 - Imagem metalográfica da região 6 - porção externa da chapa - aproximação de 100 vezes



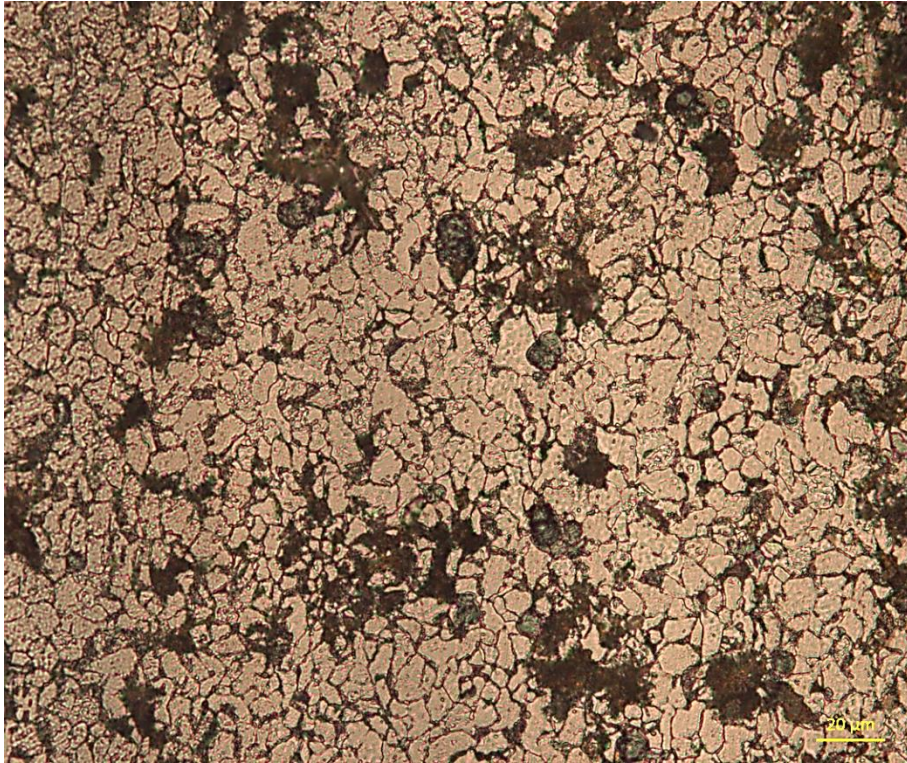
Fonte: O autor.

Figura D. 44 - Imagem metalográfica da região 6 - porção externa da chapa - aproximação de 200 vezes



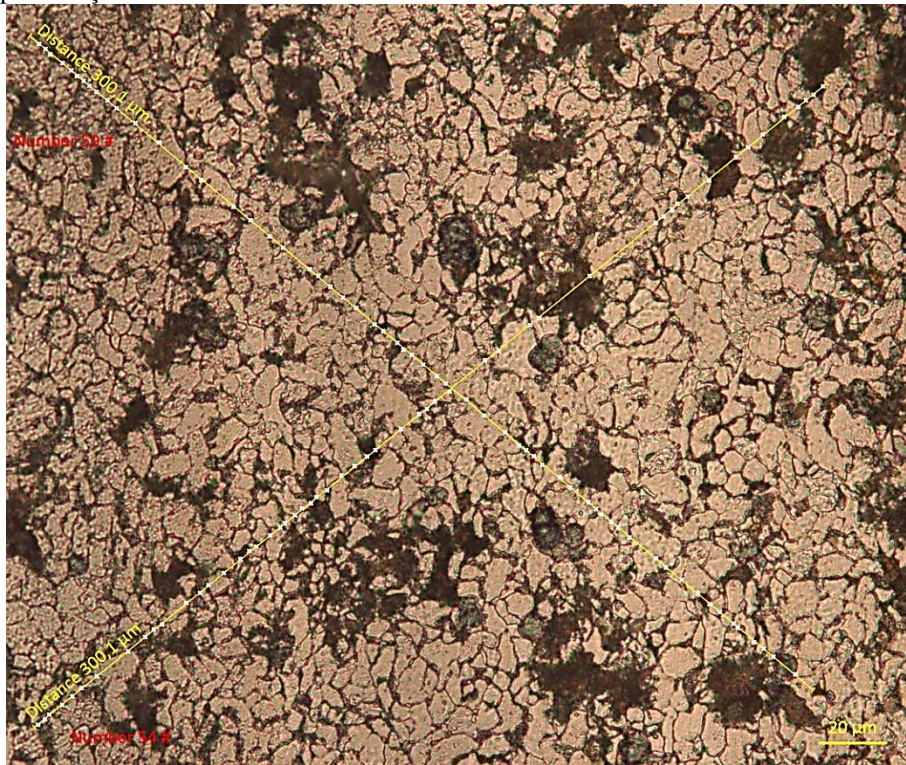
Fonte: O autor.

Figura D. 45 - Imagem metalográfica da região 6 - porção externa da chapa - aproximação de 500 vezes



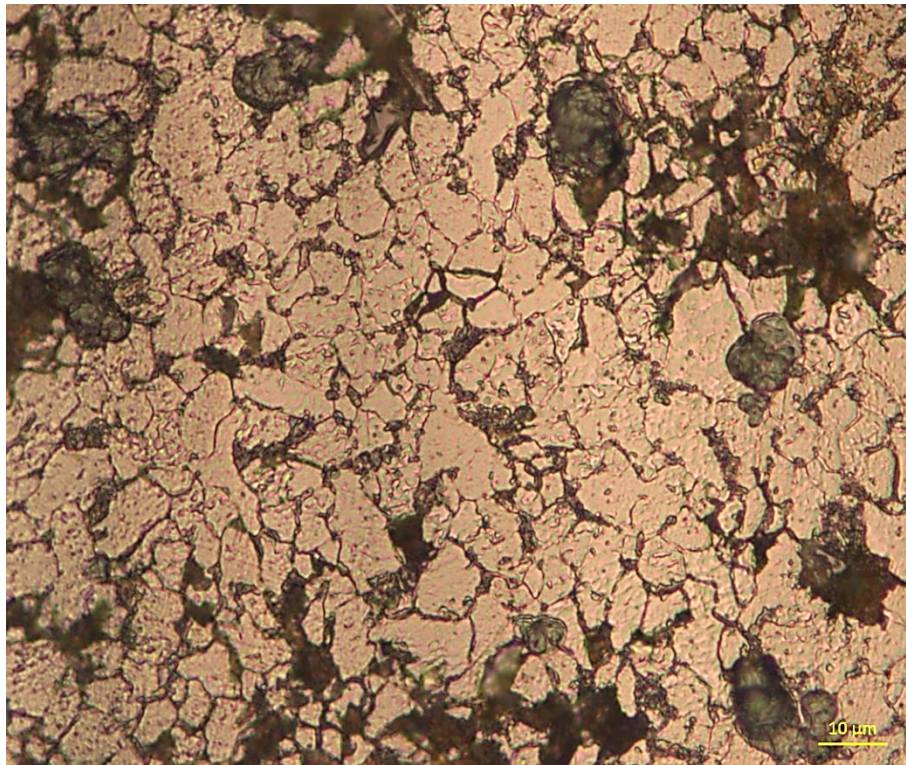
Fonte: O autor.

Figura D. 46 - Imagem metalográfica com marcações da região 6 - porção externa da chapa - aproximação de 500 vezes



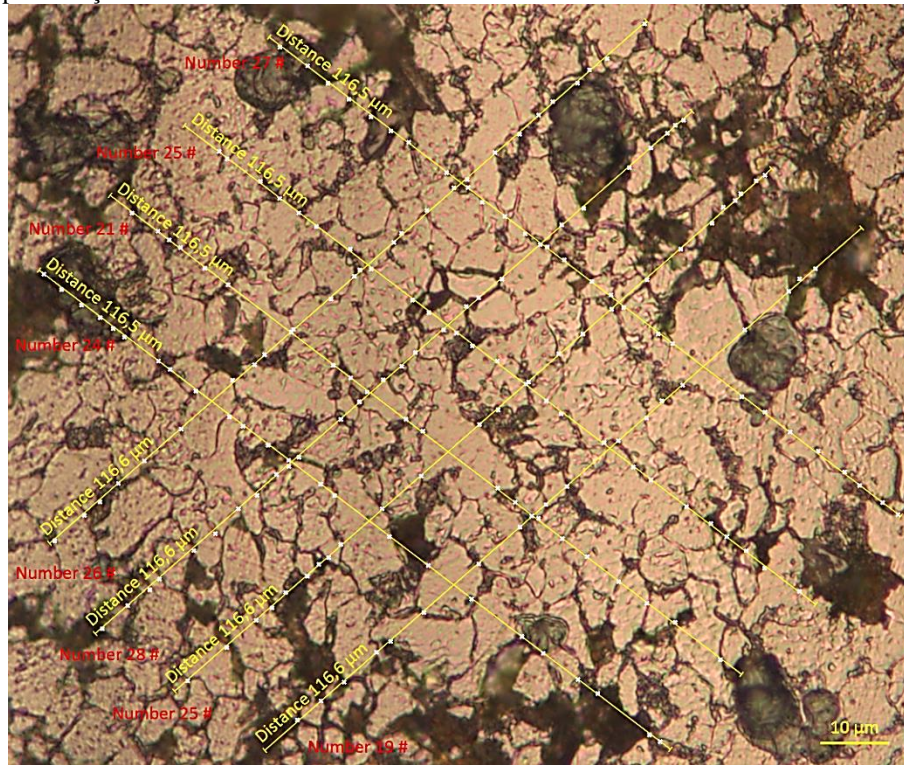
Fonte: O autor.

Figura D. 47 - Imagem metalográfica da região 6 - porção externa da chapa - aproximação de 1000 vezes



Fonte: O autor.

Figura D. 48 - Imagem metalográfica com marcações da região 6 - porção externa da chapa - aproximação de 1000 vezes



Fonte: O autor.