

## 8 Resultados (Parte 05)

A parte 05 compara as curvas obtidas nos dois curvamentos a quente realizados a 2500 e 500 Hz, enfatizando as mudanças dimensionais, microestruturais e as correlações entre propriedades mecânicas e microestrutura do tubo de aço API X80 de Pcm = 0,17% após operações de curvamento a quente com frequências de 2500 Hz e 500 Hz.

### 8.1. Mudanças dimensionais na espessura de parede do tubo

A tabela 20 exibe as alterações dimensionais provocadas pela operação de curvamento a quente, tanto a 2500 quanto a 500 Hz, na espessura de parede. São comparadas a espessura do trecho reto com as espessuras das regiões da curva e respectiva zonas de transição (ZT).

Tabela 20 – Espessura de parede no trecho reto, zona de transição (ZT) e na curva.

Curva	Trecho Reto (mm)	Linha Neutra (mm)	(%)	Extradorso (mm)	(%)	Intradorso (mm)	(%)
2500 Hz	19,4	18,6	-4,12	18,3	-5,67	21	+8,25
500 Hz		19,4	0,00	17,6	-9,28	21,2	+9,28
ZT 500 Hz		19,4	0,00	18,7	-3,61	20,6	+6,19

### 8.2. Caracterização microestrutural da curva

Na seção mais externa da espessura de parede na curva obtida a 2500 Hz, submetida a resfriamento em água, observou-se além da presença de martensita de baixo carbono, uma alta fração volumétrica de bainita superior coexistindo com grãos ferríticos. Com a redução das taxas de resfriamento, a parte interna da espessura de parede na curva mostra que a evolução microestrutural favoreceu a obtenção de uma maior fração volumétrica de ferrita (a fração de contornos de grãos de baixo ângulo decresce para dar lugar a grãos com contornos de alto ângulo). As figuras 66, 67, 68 e 69 apresentam a caracterização microestrutural em microscopia eletrônica de varredura (nital 2%) e a fração de ferrita com segunda fase alinhada (ferrita bainítica).

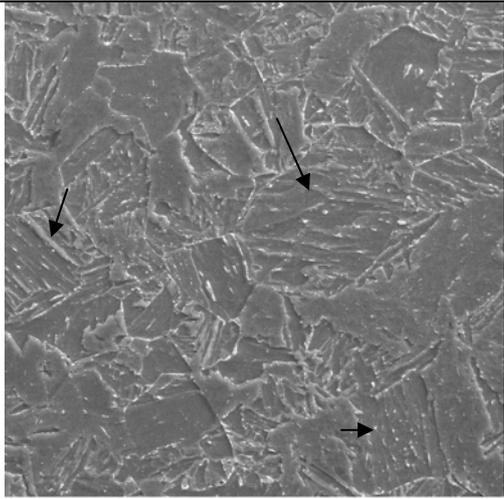
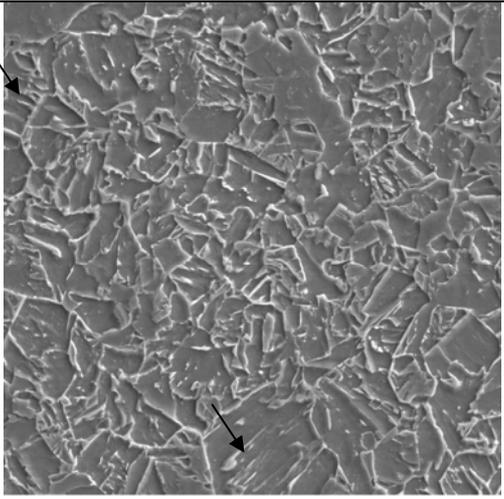
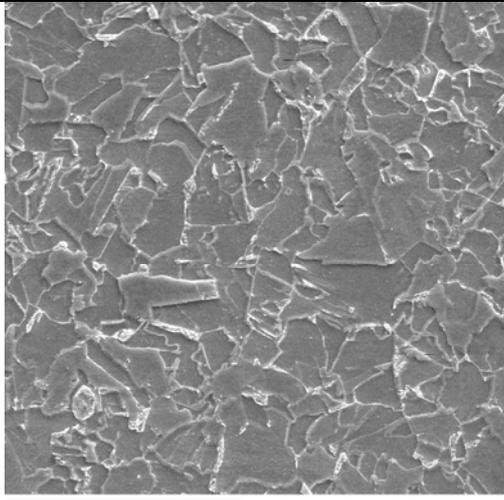
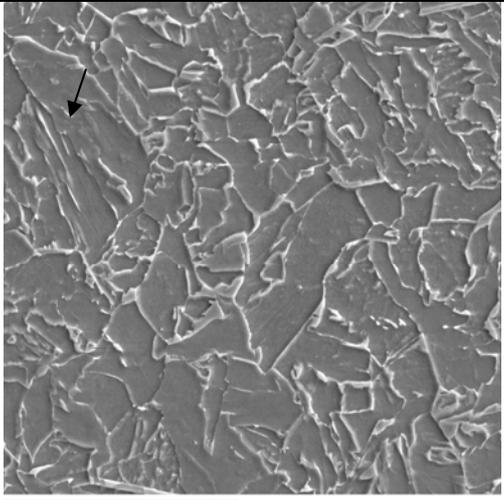
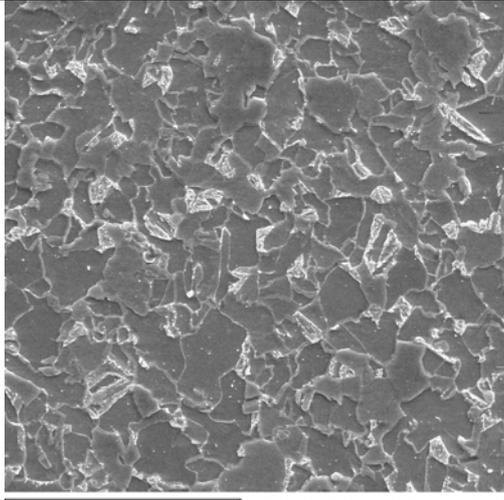
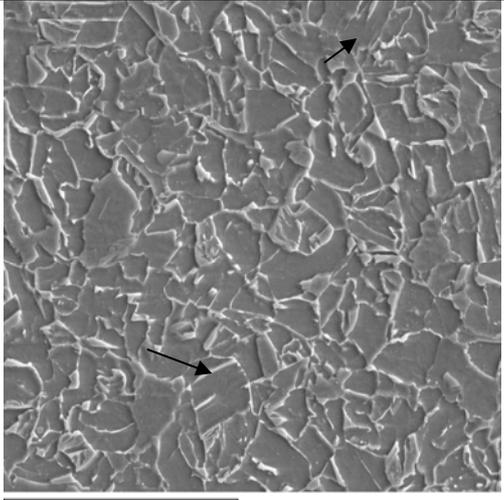
	Curva 2500 Hz	Curva 500 Hz
E X T E R N O		
	$88,2 \pm 4,5\%$	$67,3 \pm 4,7 \%$
C E N T R O		
	$49,1 \pm 6,5\%$	$47,5 \pm 5,4 \%$
I N T E R N O		
	$14,1 \pm 5,2\%$	$32,2 \pm 6,9 \%$

Figura 66 – Caracterização microestrutural, por microscopia eletrônica de varredura, da linha neutra e fração volumétrica de ferrita com segunda fase alinhada. Ataque com nital 2%.

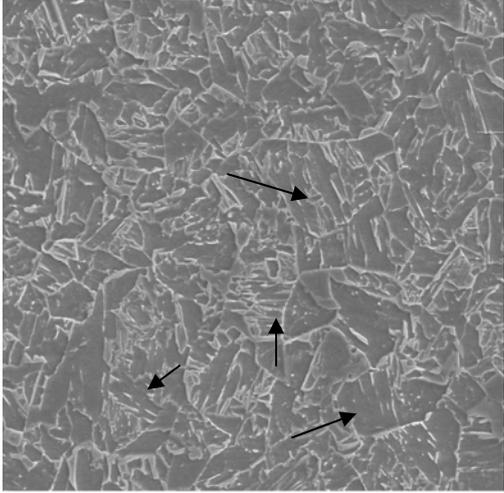
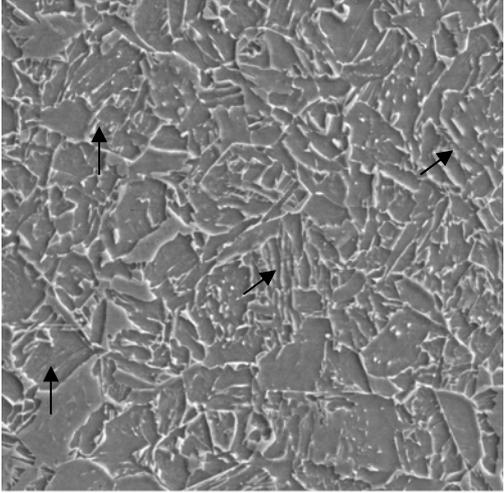
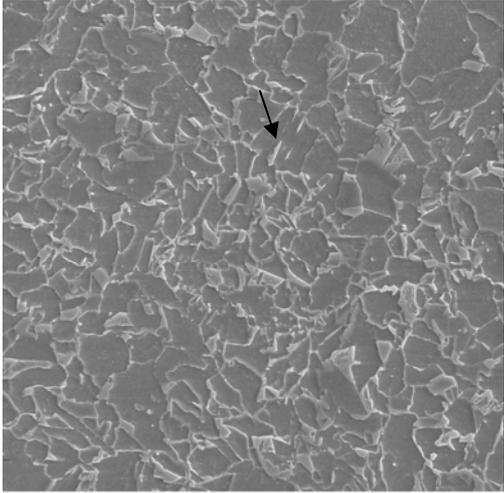
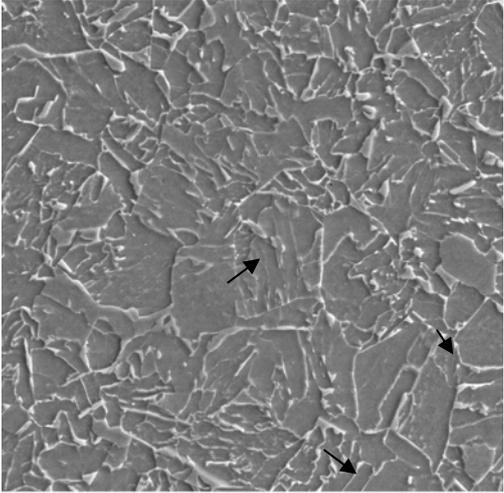
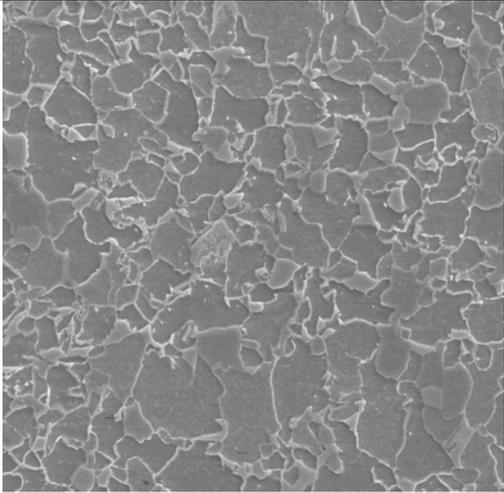
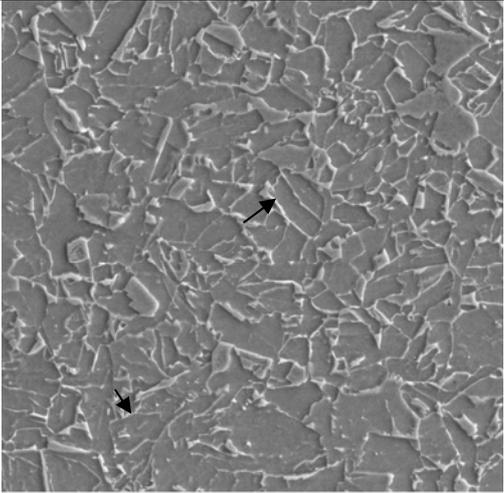
	Curva 2500 Hz	Curva 500 Hz
E X T E R N O	 <p style="text-align: center;">40µm</p>	 <p style="text-align: center;">40µm</p>
	$68,5 \pm 5,3\%$	$70,2 \pm 4,7 \%$
C E N T R O	 <p style="text-align: center;">40µm</p>	 <p style="text-align: center;">40µm</p>
	$39,4 \pm 5,2\%$	$71,2 \pm 3,9 \%$
I N T E R N O	 <p style="text-align: center;">40µm</p>	 <p style="text-align: center;">40µm</p>
	$19,0 \pm 2,5\%$	$39,3 \pm 6,7 \%$

Figura 67 – Caracterização microestrutural, por microscopia eletrônica de varredura, do extradorso e fração volumétrica de ferrita com segunda fase alinhada. Ataque com nital 2%.

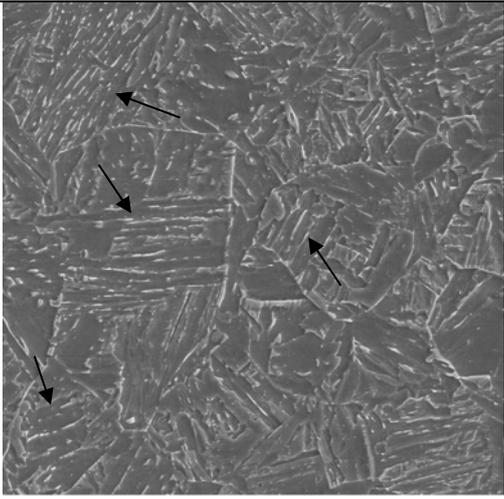
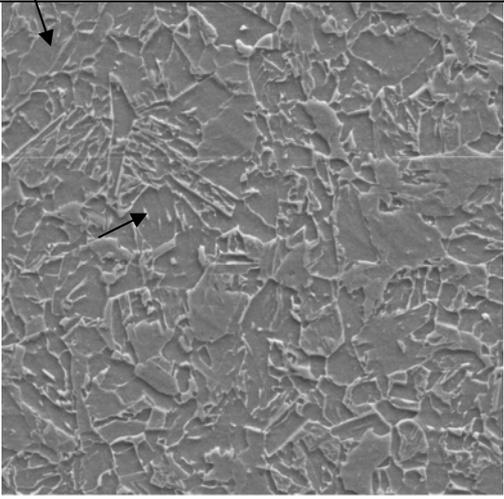
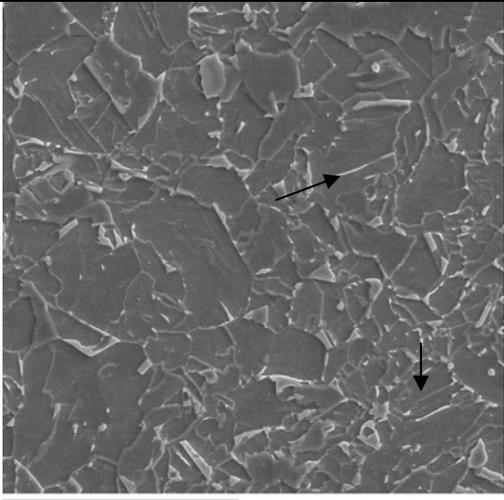
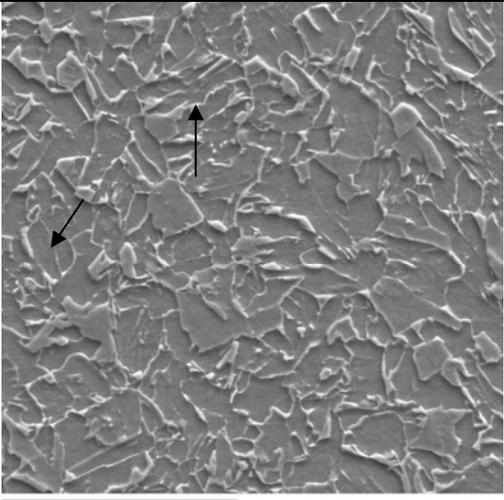
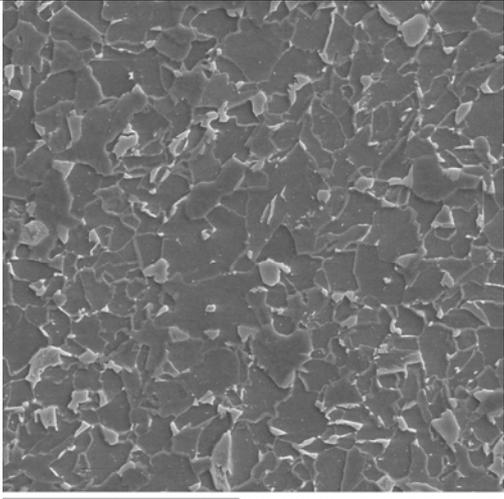
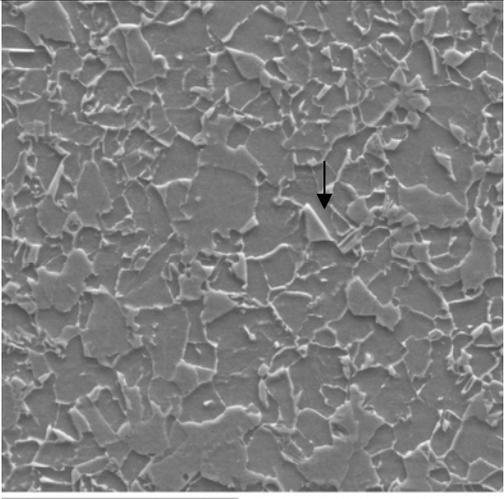
	Curva 2500 Hz	Curva 500 Hz
E X T E R N O	 <p style="text-align: center;">40µm</p>	 <p style="text-align: center;">40µm</p>
	$75,5 \pm 3,2\%$	$70,1 \pm 7,7 \%$
C E N T R O	 <p style="text-align: center;">40µm</p>	 <p style="text-align: center;">40µm</p>
	$33,1 \pm 6,2\%$	$57,1 \pm 5,3 \%$
I N T E R N O	 <p style="text-align: center;">40µm</p>	 <p style="text-align: center;">40µm</p>
	$12,6 \pm 4,3\%$	$35,4 \pm 4,3 \%$

Figura 68 – Caracterização microestrutural, por microscopia eletrônica de varredura, do intradorso e fração volumétrica de ferrita com segunda fase alinhada. Ataque com nital 2%.

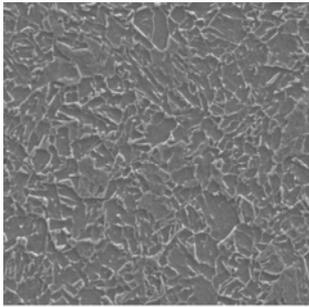
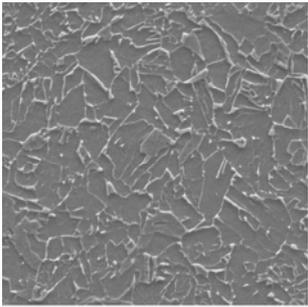
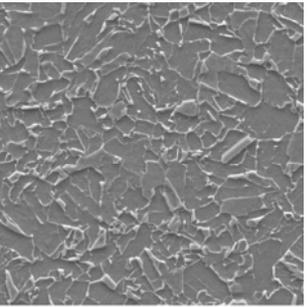
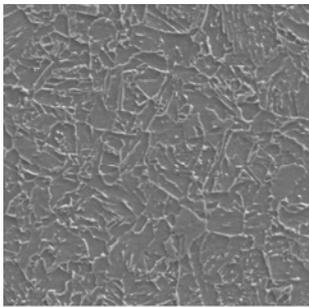
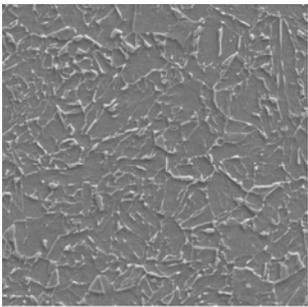
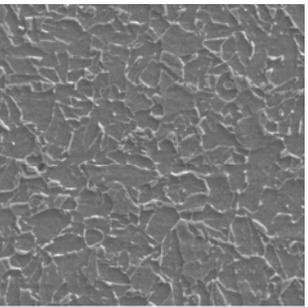
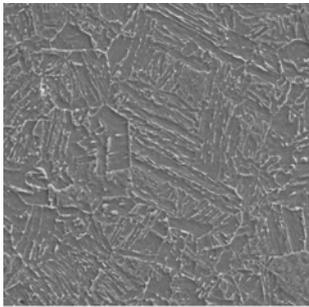
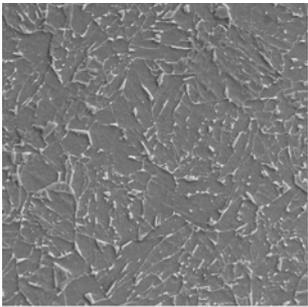
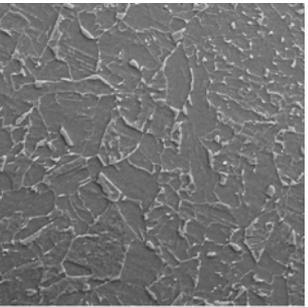
ZT 500 Hz	Externo	Meio	Interno
ZT Linha Neutra			
	$49,6 \pm 5,9 \%$	$45,3 \pm 7,0 \%$	$37,7 \pm 4,6 \%$
ZT Extradorso			
	$74,2 \pm 5,5 \%$	$66,0 \pm 3,4 \%$	$45,4 \pm 4,1 \%$
ZT Intradorso			
	$84,2 \pm 3,5 \%$	$68,7 \pm 5,4 \%$	$51,7 \pm 4,6 \%$

Figura 69 – Caracterização microestrutural, por microscopia eletrônica de varredura, dos trechos da zona de transição (ZT) e fração volumétrica de ferrita com segunda fase alinhada. Ataque com nital 2%.

### 8.2.1. Precipitados de elementos de liga

A região da curva apresenta precipitados contendo elementos microligantes, oriundos do trecho reto laminado os quais não foram dissolvidos durante o ciclo térmico de curvamento a quente a 2500 Hz (figuras 70 e 71).

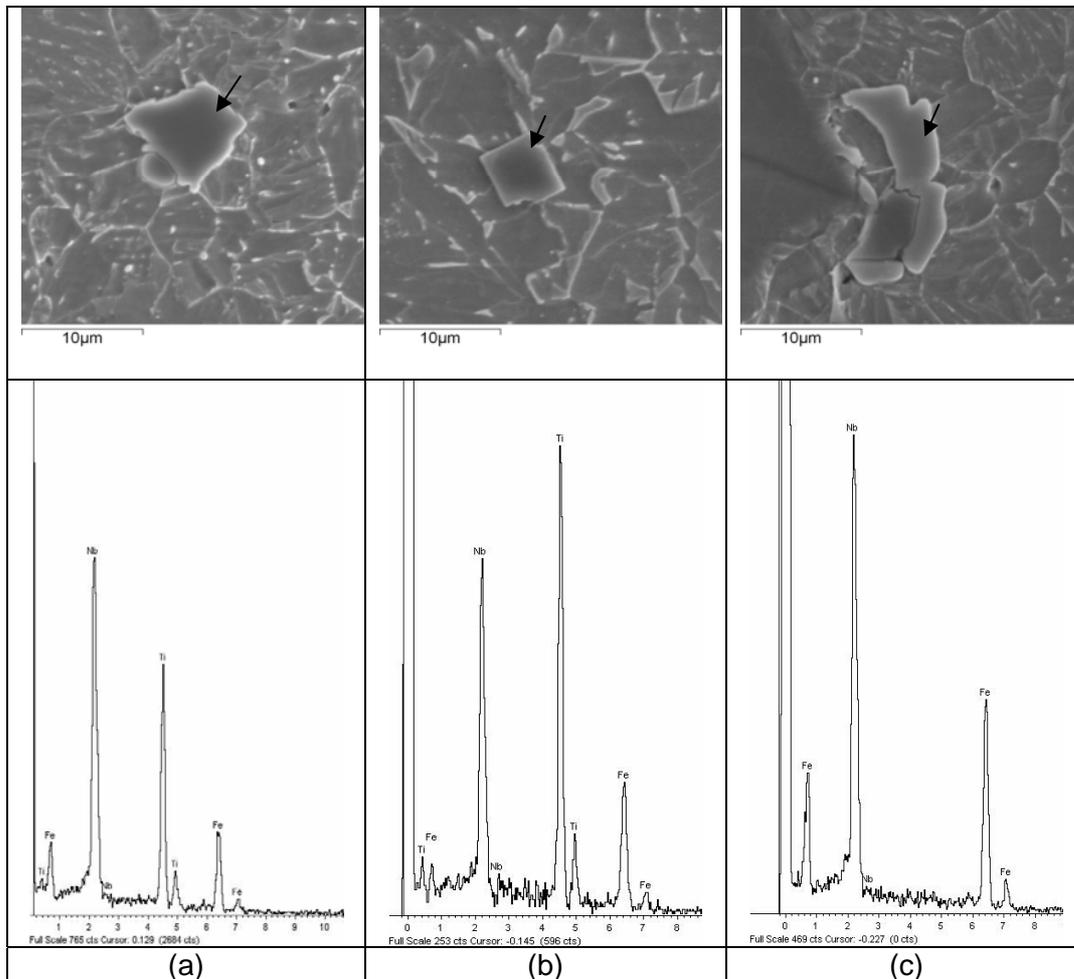


Figura 70 – Morfologia dos precipitados. Microscopia eletrônica de varredura (MEV). Ataque LePera Modificado com pré ataque em Nital 2%. (a) Precipitado de Nb e Ti, (b) Precipitado rico em Ti, contendo Nb e (c) Precipitado de Nb puro.

A figura 71 mostra, por microscopia eletrônica de transmissão, a precipitação grosseira do Tipo I [28, 29] observada inicialmente, na parte externa da espessura de parede do intradorso do tubo API X80 curvado a 2500 Hz, por microscopia eletrônica de varredura na figura 70.

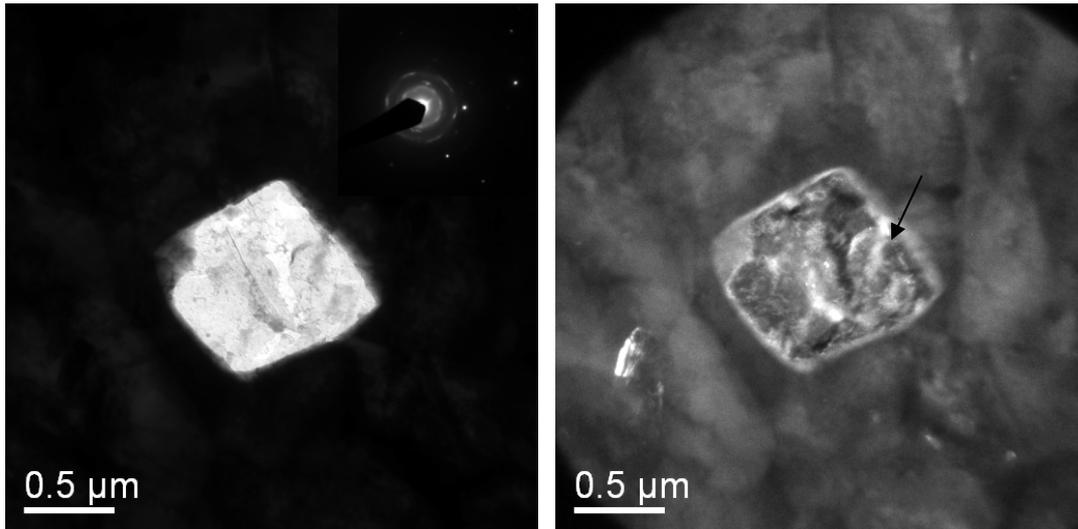


Figura 71 – Precipitação grosseira ( $0,92 \mu\text{m}$ ) cuboidal, possivelmente (em função de sua morfologia) um carbonitreto de Nb e Ti.

Esta precipitação é proveniente da etapa de laminação da chapa tendo sido observada com maior frequência no centro da espessura do tubo (aproximadamente a 9 mm da superfície externa da espessura de parede do tubo) em regiões de microsegregação, herdadas da chapa laminada que foi utilizada para fabricar o tubo. Isto mostra que o ciclo térmico de curvamento a quente não atingiu as condições de temperatura e tempo suficiente para dissolução de precipitados grosseiros contendo Nb e Ti.

Durante a etapa de resfriamento do curvamento a quente é possível que alguma precipitação fina tenha se formado favorecida pela presença de discordâncias.

### 8.2.2.

#### Caracterização microestrutural da região externa da espessura de parede na curva

Devido ao baixo carbono equivalente ( $P_{cm} = 0,17\%$ ) a parte externa da curva (obtida com 2500 Hz e submetida a resfriamento em água) apresentou microestrutura com um certo percentual de ferrita alotriomorfa juntamente com bainita superior.

Quando transformadas a altas taxas de resfriamento, como ocorre na superfície externa de parede da curva, as ripas de ferrita bainítica apresentam um forte alinhamento, enquanto que a orientação mais randômica ocorre para taxas de resfriamento menores [25]. Porém, a observação de alguns grãos bainíticos localizados a 1 mm da superfície externa da curva, figura 72, mostra que o alinhamento das ripas bainíticas aparentemente depende da temperabilidade local do grão (tamanho de grão austenítico e composição química) e não somente das taxas de resfriamento aplicadas durante a etapa de resfriamento final.

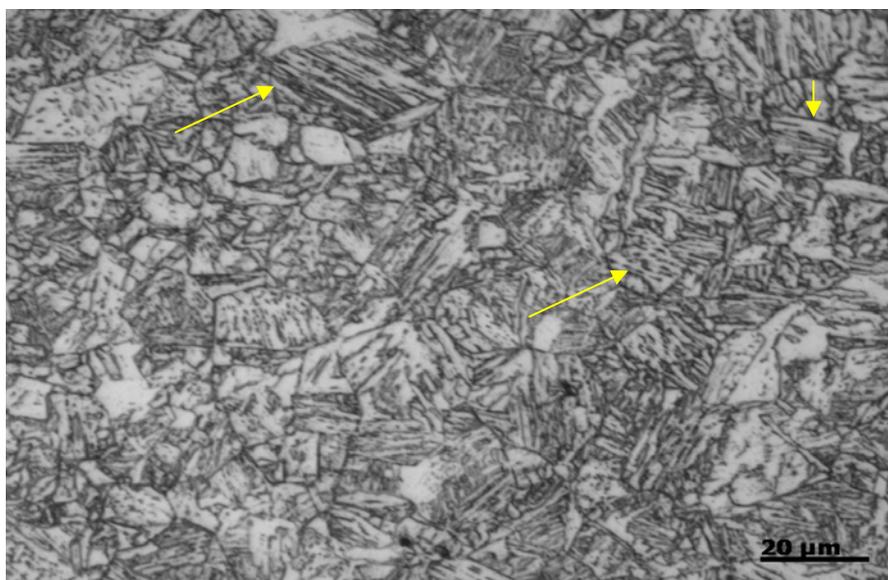


Figura 72 – Microestrutura caracterizada a 1 mm da superfície externa da espessura de parede no intradorso, tubo API X80 com  $P_{cm} = 0,17\%$ , curvado com frequência de 2500 Hz.

A figura 73 caracteriza a região externa da espessura das curvas para diferentes parâmetros de curvamento.

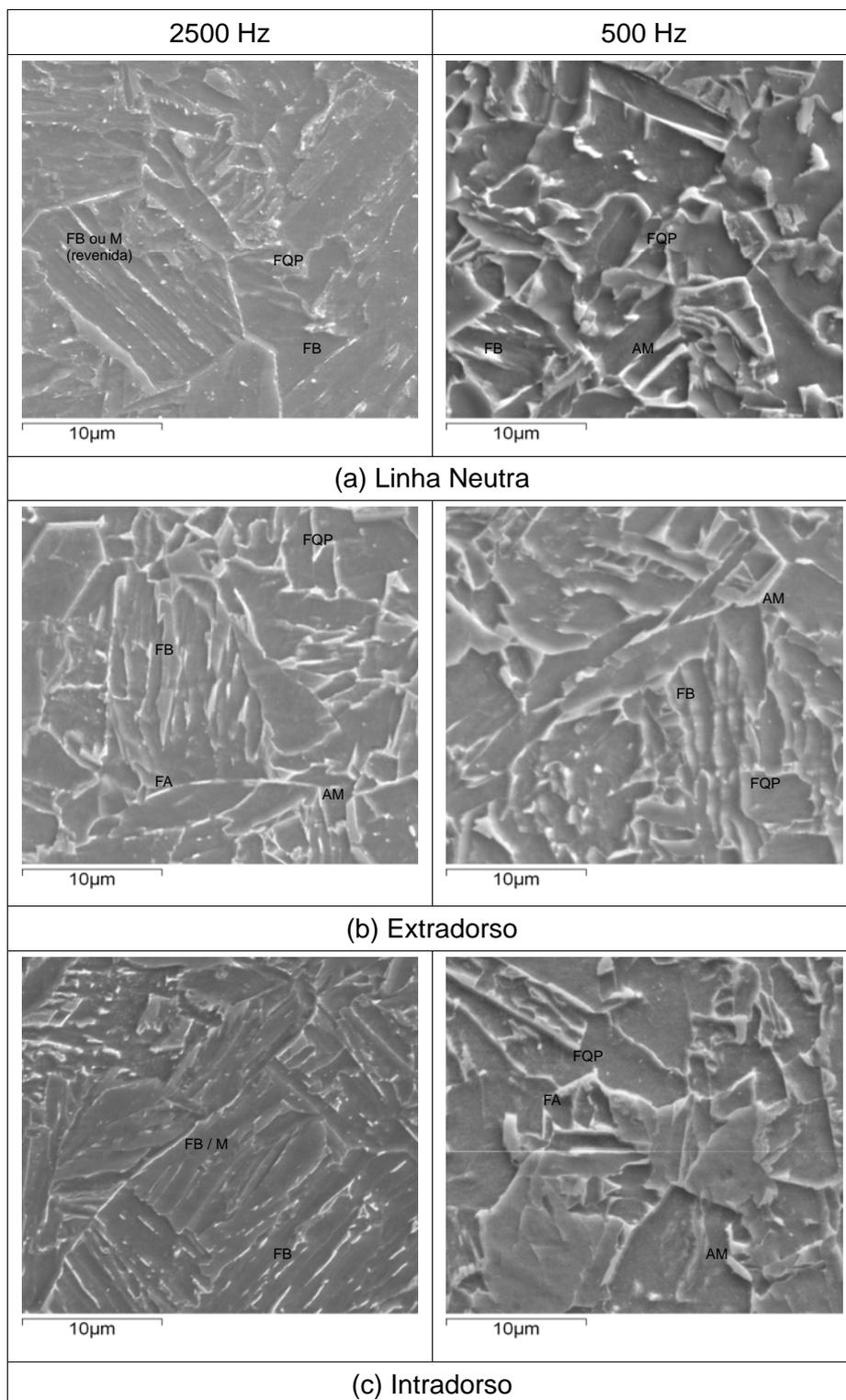


Figura 73 – Alterações microestruturais decorrentes de curvamentos a quente com parâmetros diferenciados de frequência e potência. Ataque nital 2%, MEV. Onde: FP – Ferrita poligonal, FQP – Ferrita quase poligonal, FA – Ferrita acicular, FB – Ferrita bainítica, M – Martensita, AM – constituinte austenita/martensita.

Em espessuras mais próximas a frente de resfriamento (como a observada nas figuras 72 e 73), onde a ação do resfriamento é mais intensa, também foi possível observar alguns grãos de martensita de baixo carbono. A figura 74 mostra o aspecto microestrutural da superfície externa da espessura de parede da curva 2500 Hz (intradorso), onde são observados contornos de grãos de baixo ângulo. A subestrutura deste tipo de martensita (em forma de plaquetas) possui uma alta densidade de discordâncias (figura 74b). Filmes de constituinte AM posicionados entre as ripas são observados na figura 74c,d.

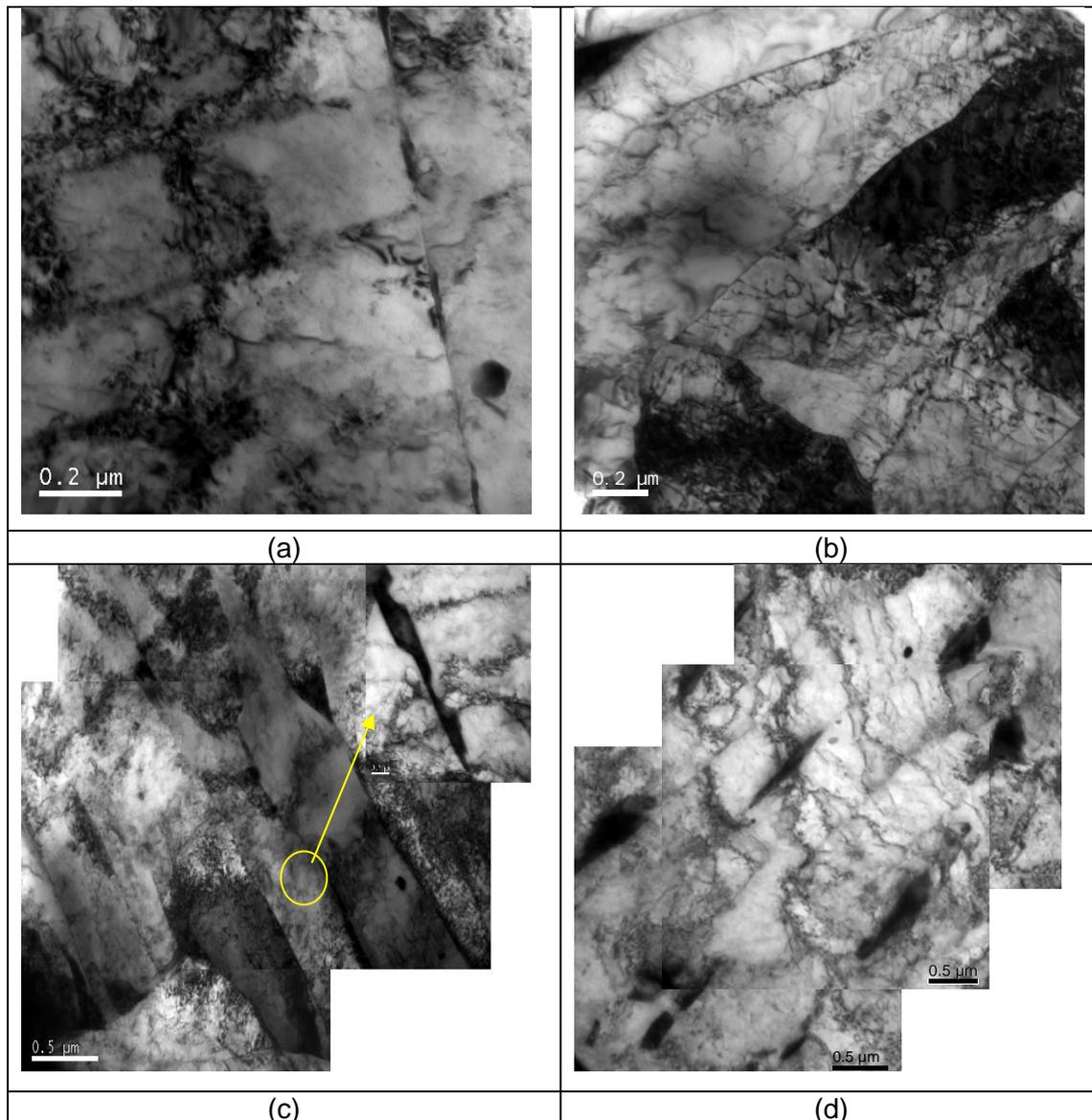


Figura 74 – Aspecto microestrutural da parte externa da espessura de parede do intradorso como curvado a 2500 Hz. Microscopia eletrônica de transmissão em campo claro.

A presença de discordâncias em grãos ferríticos é um fator adicional de endurecimento, tendo sido observados por microscopia eletrônica de transmissão alguns grãos ferríticos com elevada densidade de discordâncias em amostragem removida da parte externa da curva 2500 Hz (figura 75). É possível que a reação ferrítica (transformações de elevadas temperaturas) possa ter sido favorecida pela deformação atuando durante o processo de curvamento a quente, porém o baixo percentual de carbono do aço também explica sua presença. A elevada densidade de discordâncias destes grãos ferríticos está associada à presença de microconstituintes de baixa temperatura de transformação que induzem deformação a matriz adjacente.

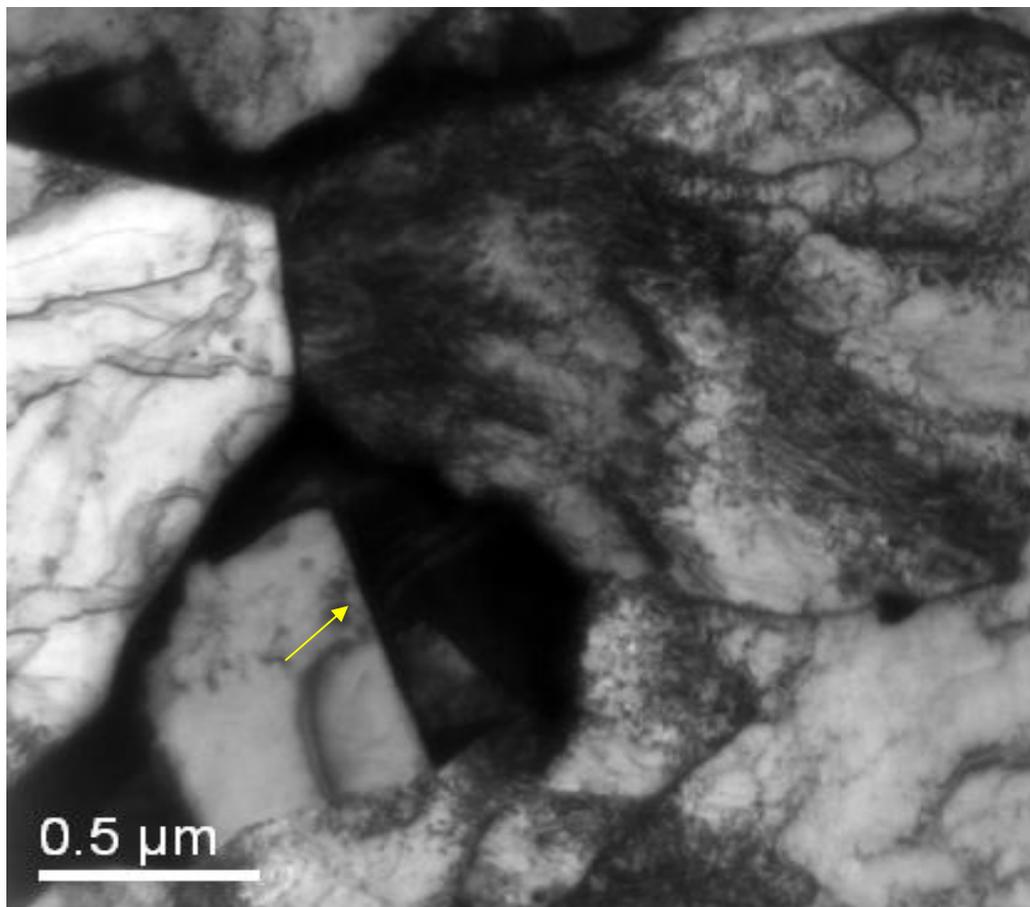


Figura 75 – Grãos ferríticos com elevada densidade de discordâncias e constituinte AM (seta) nos contornos de grão, observados para a região curvada a 2500 Hz.

### 8.2.3.

#### Caracterização microestrutural das regiões centro-externas da espessura da curva de parede na curva

A figura 76 mostra as regiões centro-externas da espessura de parede das curvas para diferentes parâmetros de curvamento.

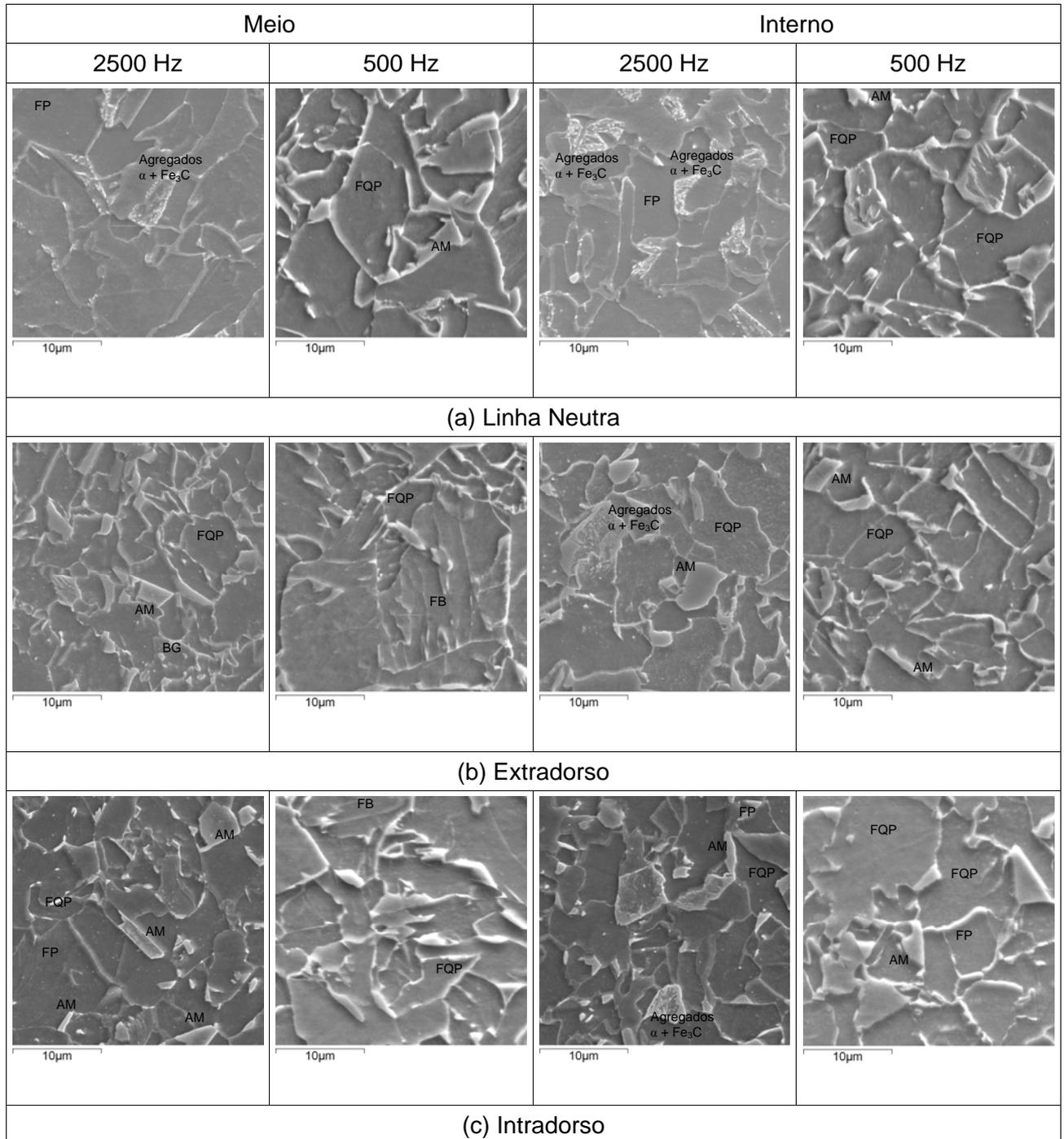
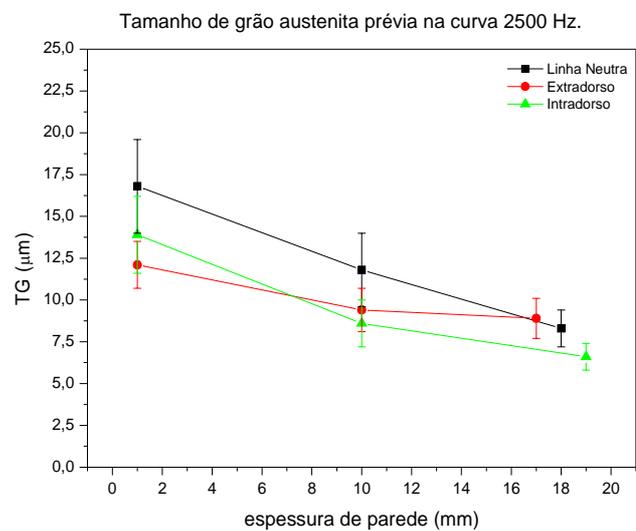


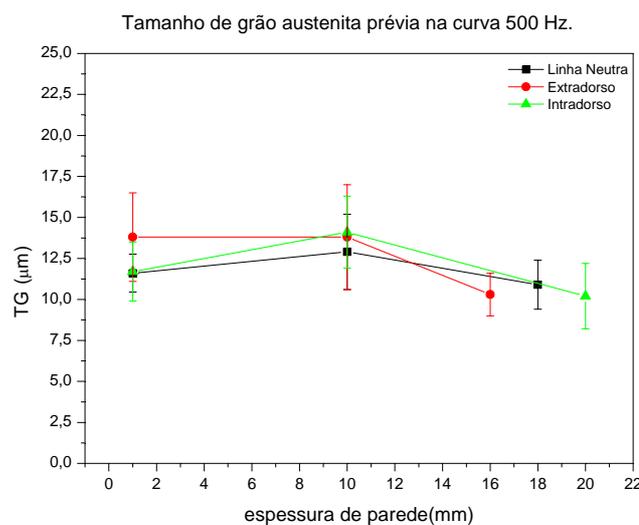
Figura 76 – Alterações microestruturais decorrentes de curvamentos a quente com parâmetros diferenciados de frequência e potência. Ataque nital 2%, MEV. Onde: FP – Ferrita poligonal, FQP – Ferrita quase poligonal, FA – Ferrita acicular, FB – Ferrita bainítica, BG – Bainita granular, AM – constituinte austenita/martensita e Agregados  $\alpha + Fe_3C$  – agregados de ferrita e carbonetos.

### 8.2.4. Evolução de tamanho de grão da austenita prévia

A evolução do tamanho de grão austenítico, ao longo da espessura de parede do tubo na curva, revela que o ciclo térmico de curvamento a quente 500 Hz foi mais intenso do que o curvamento 2500 Hz, tal como mostraram os cálculos de calor dissipado ao longo da espessura e modelos de distribuição de isothermas exibidos no capítulo 03 (Material e Procedimento Experimental). A comparação da evolução do tamanho de grão austenítico entre os dois curvamentos pode ser avaliada através do gráfico da figura 77.



(a)



(b)

Figura 77 – Evolução do tamanho de grão da austenita prévia para trechos que compõem as curvas 2500 Hz (a) e 500 Hz (b).

Ao contrário de uma têmpera convencional (aquecimento em forno) o aquecimento por indução ocorre a elevadas taxas de aquecimento e curtos períodos de permanência nas temperaturas máximas de austenitização (1030 a 1050°C), o que resultaria em tamanhos de grãos austeníticos mais refinados. Assim, em comparação com os tratamentos de têmpera convencional, o maior refinamento do tamanho de grão austenítico obtido por aquecimento por indução não implica em comparações proporcionais de temperatura de austenitização. A obtenção, em amostras do mesmo aço API X80, de tamanho de grão austenítico médio similar em têmpera convencional e por têmpera por indução possivelmente é uma indicação de que a austenitização do aço durante o processo de têmpera por indução ocorreu a uma temperatura maior do que aquela aplicada para austenitizar o mesmo aço em têmpera convencional. Assim acredita-se que a austenitização da espessura interna da curva 2500 Hz possa ter atingido temperaturas superiores a 950°C, porém inferiores a 1000°C.

#### **8.2.5.**

#### **Evolução de fração volumétrica dos microconstituintes através da espessura da espessura de parede na curva.**

As figuras 78 e 79 mostram a presença do constituinte AM ao longo da espessura de parede na curva 2500 Hz, visualizado com o ataque LePera modificado, e a evolução da fração volumétrica do AM.

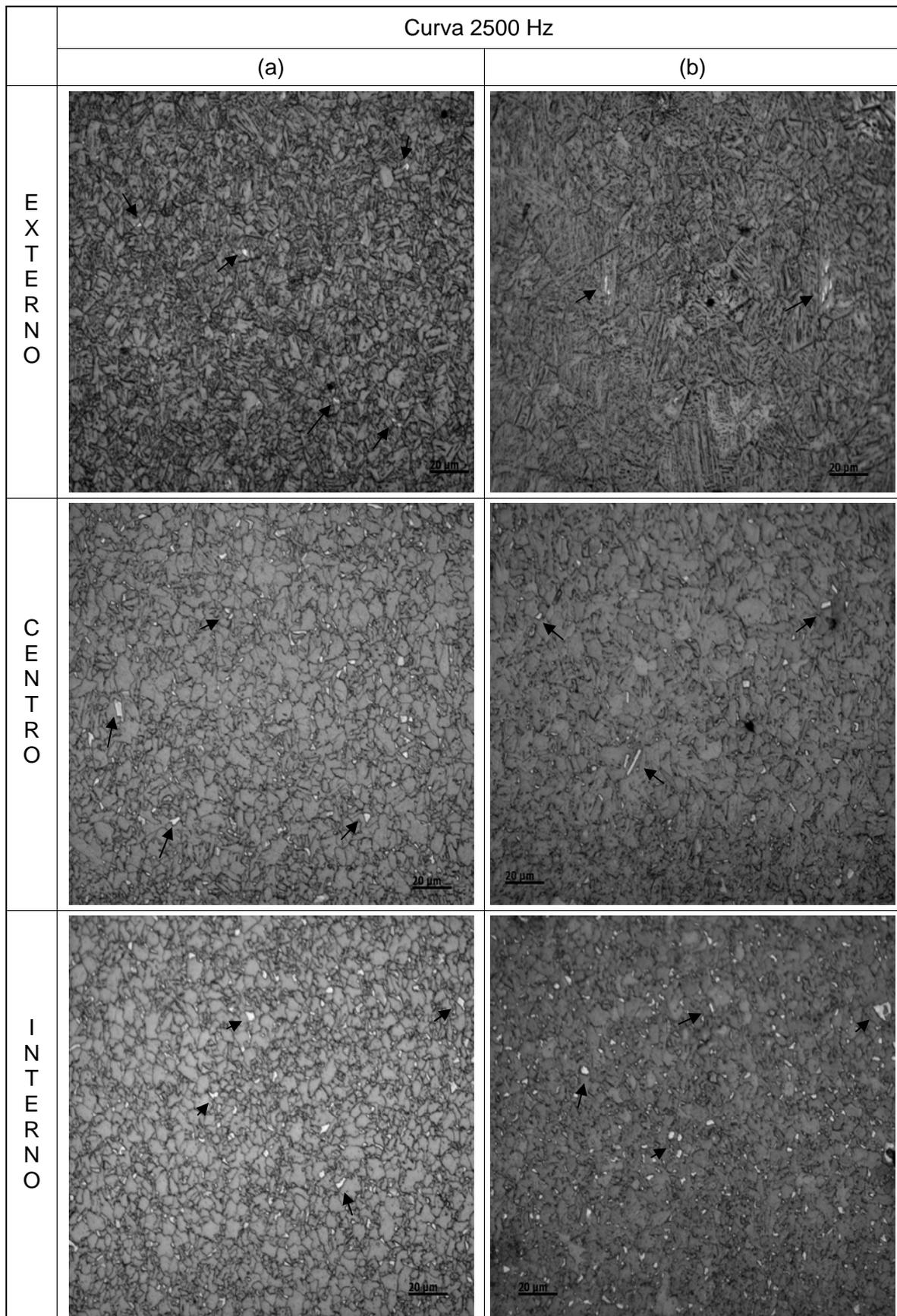


Figura 78 – Distribuição de constituinte AM em função da espessura de parede do tubo na curva 2500 Hz. Microscopia Óptica, Ataque LePera modificado (imagens em escala de cinza). (a) Extradorso e (b) Intradorso.

Correlação entre espessura de parede (e) na curva 2500 Hz e percentual de AM

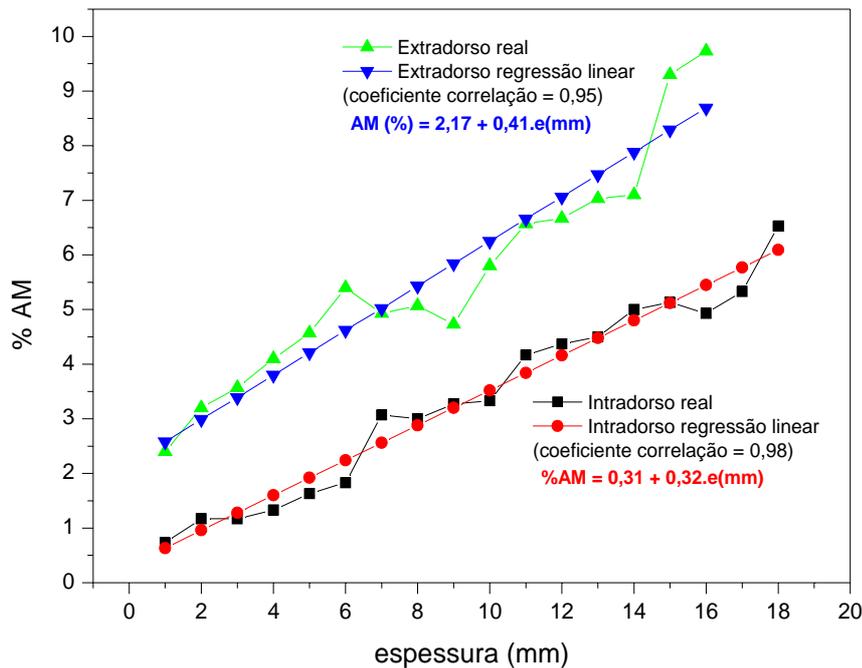


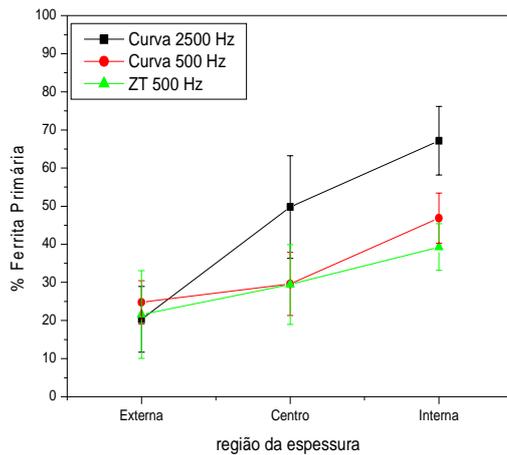
Figura 79 – Correlação de fração volumétrica de AM com espessura de parede do tubo na curva 2500 Hz.

A figura 79 mostra que é possível através de regressão linear, com bons coeficientes de correlação, modelar a fração volumétrica de constituinte AM ao longo da espessura de parede na curva 2500 Hz para trechos do extradorso e intradorso. Os baixos percentuais observados próximos a superfície externa da espessura (resfriada a água) se elevam em direção a superfície interna de parede na curva (resfriada ao ar calmo), o que indica que a fração volumétrica de constituinte AM é sensível a variação das taxas de resfriamento ao longo da curva, tendo potencial para trazer informações indiretas sobre as mesmas. O deslocamento observado entre as retas que modelam a fração volumétrica de AM ao longo da espessura, para os trechos do extradorso e intradorso, pode está associado a diferenças de tamanho de grão austenítico e variações das taxas resfriamento, porém ainda precisa de maiores esclarecimentos.

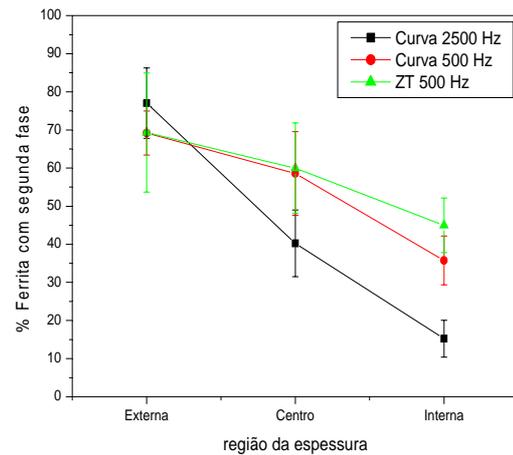
Os gráficos da figura 80 revelam a distribuição microestrutural ao longo da espessura de parede para os trechos das curvas 500 Hz e 2500 Hz e zona de transição 500 Hz, onde as microestruturas quantificadas foram identificadas em quatro tipos:

- Ferrita primária – ferrita poligonal e quase poligonal, alotriomorfa ou idiomorfa, resultantes de transformação proeutetóide.
- Ferrita com segunda fase alinhada – ferrita presente nos microconstituintes de baixa temperatura de transformação, tais como a ferrita bainítica e grãos ferríticos de contornos de baixo ângulo.
- Constituinte AM;
- Agregados eutetóides – Agregados de ferrita e carbonetos.

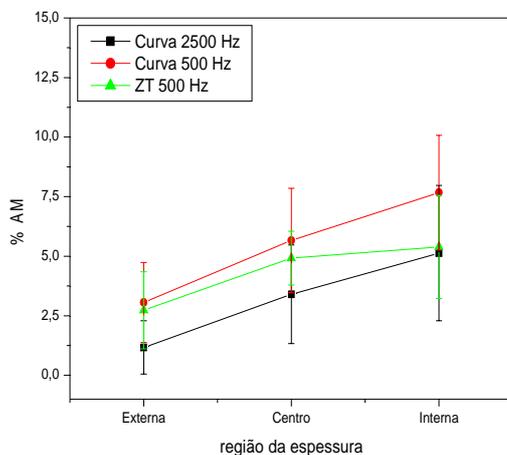
Enquanto as frações volumétricas de ferrita primária, constituinte AM e agregados eutetóides (figuras 80a, c, d) crescem na direção da superfície interna da espessura de parede do tubo na curva, sendo favorecidas pela redução das taxas de resfriamento ao longo da espessura, a fração volumétrica de ferrita com segunda fase alinhada decresce (figura 80b). A fração volumétrica de ferrita com segunda fase alinhada é maior nas camadas centro-internas da espessura de parede para os trechos da curva 500 Hz quando comparada com os mesmos trechos da curva 2500 Hz.



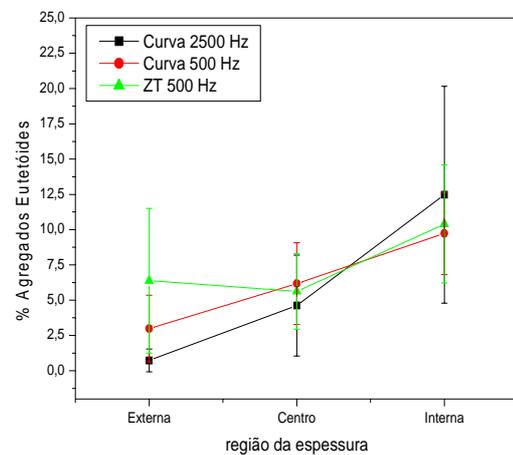
(a) Ferrita Primária



(b) Ferrita com segunda fase



(c) Constituinte AM



(d) Agregado eutetóide

Figura 80 – Evolução das frações volumétricas de (a) ferrita primária, (b) ferrita com segunda fase alinhada, (c) constituinte AM e (d) agregados de ferrita e carbonetos, ao longo da espessura de parede das curvas 2500 Hz e 500 Hz e zona de transição 500 Hz (média das regiões que compõem as curvas).

A figura 81 correlaciona o tamanho médio de grão austenítico (todas as regiões que compõem a curva e zona de transição) com a fração volumétrica média de ferrita com segunda fase alinhada presente na região interna da espessura de parede da curva, resfriada ao ar calmo.

Na região da espessura interna de parede das curvas submetidas a resfriamento em ar calmo a fração volumétrica de ferrita com segunda fase alinhada aumenta com o tamanho de grão da austenita prévia.

Evolução do fração volumétrica de ferrita com segunda fase alinhada (em resfriamento ao ar calmo) em função do tamanho de grão austenítico (espessura interna das curvas)

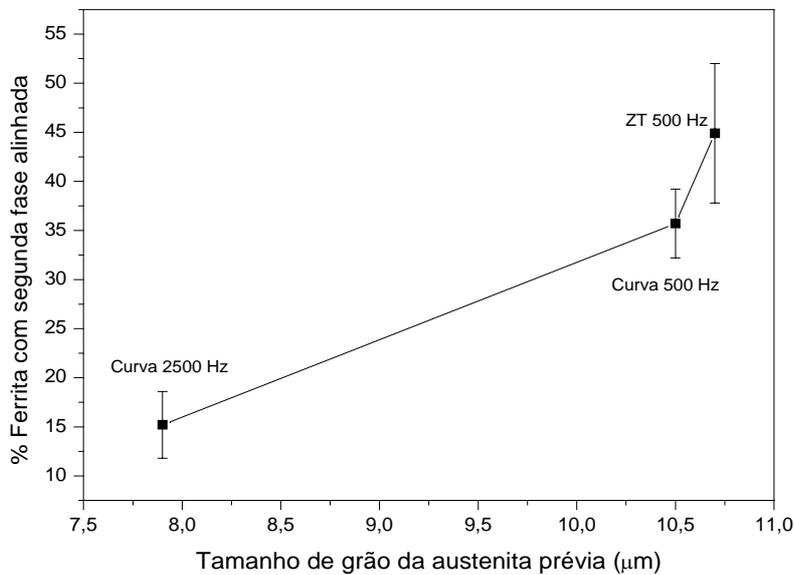
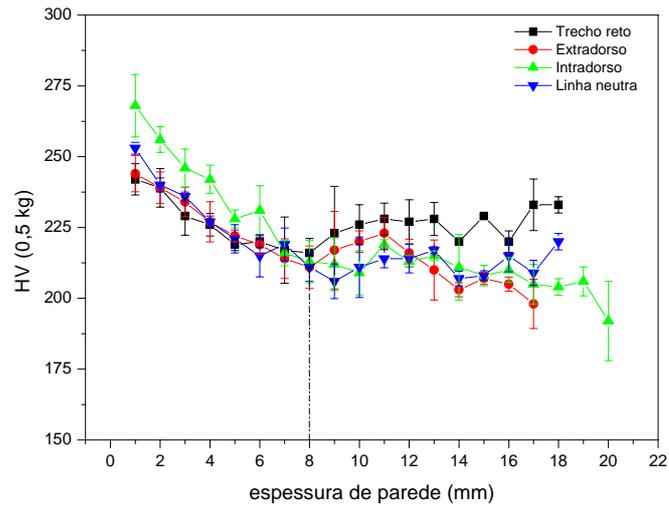


Figura 81 – Fração volumétrica de ferrita com segunda fase alinhada em função do tamanho de grão da austenita prévia, presente na espessura interna de parede das curvas submetidas a resfriamento em ar calmo.

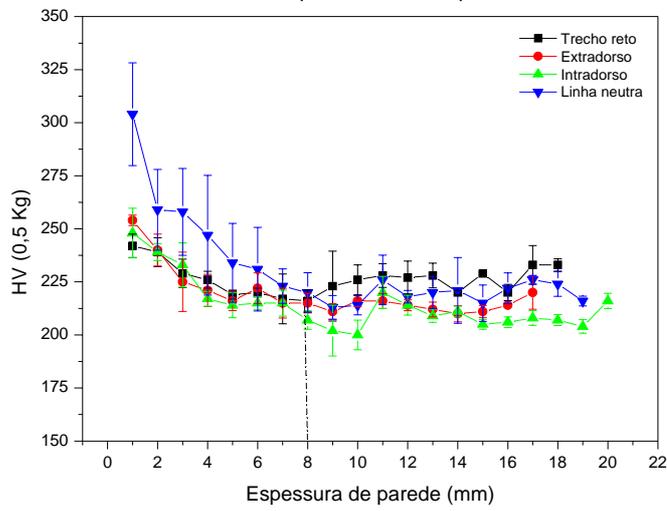
### 8.3.

#### Perfis de microdureza ao longo da espessura de parede na curva

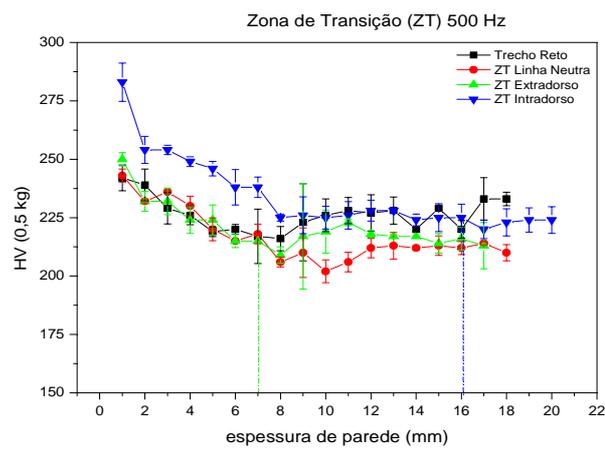
A figura 82 exibe a evolução da microdureza ao longo da espessura de parede na curva e na zona de transição a 500 Hz comparando os dois curvamentos, com parâmetro de frequência de 2500 Hz e 500 Hz. As camadas endurecidas para ambos os curvamentos se situaram próximas de 8 mm de espessura e corresponde o ponto ao longo da espessura de parede do tubo a partir do qual os valores médios de microdureza tornam-se inferiores aos valores de microdureza apresentados pelo trecho reto (informa a microdureza original do material como laminado). Esta camada está diretamente associada a capacidade do material apresentar profundidade de endurecimento por têmpera, assim não representa a camada afetada pelas correntes induzidas. Destaque para a distribuição de microdurezas da zona de transição do intradorso que ao longo da espessura de parede da curva apresentou valores de microdureza superiores ou proporcionais aos valores apresentados pelo trecho reto até uma profundidade de 16 mm a partir da superfície externa do tubo (resfriada em água).



(a)



(b)



(c)

Figura 82 – Distribuição de microdurezas ao longo da espessura de parede nas curvas (Profundidade de têmpera). (a) Curva 2500 Hz; (b) Curva 500 Hz; (c) Zona de Transição 500 Hz.

O comportamento de decaimento dos valores de microdureza a partir da superfície externa da curva (resfriada em água) até a superfície interna da curva (resfriada ao ar calmo) aparentemente pode ser modelado por uma equação do tipo exponencial decrescente.

A figura 83 mostra que as médias de microdureza em função da evolução microestrutural ao longo da espessura de parede, para as curvas 2500 e 500 Hz, encontram-se na mesma faixa desde as regiões externas da espessura (resfriadas em água) até as camadas mais centrais da espessura de parede. Esta figura (83) compara as médias de microdureza em função da espessura para curva 2500 Hz e 500 Hz, além da zona de transição 500 Hz.

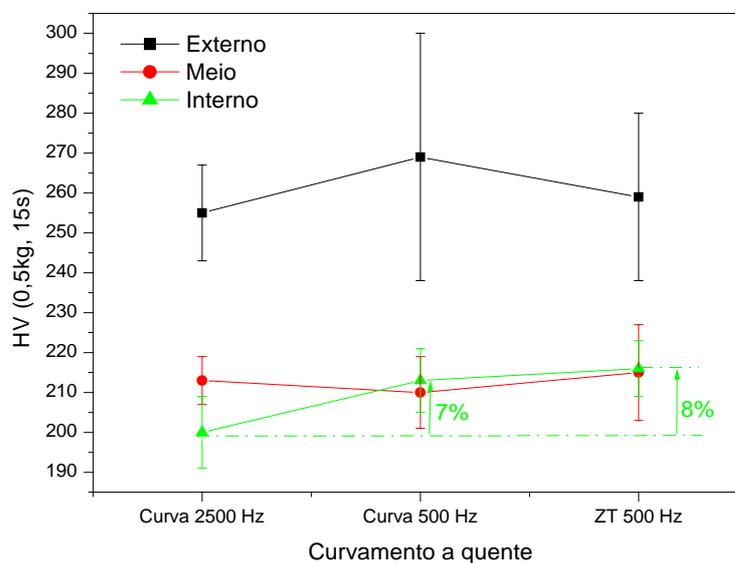


Figura 83 – Microdurezas ao longo da espessura de parede na curva e na zona de transição.

Observa-se (figura 83) que as microdurezas médias das camadas mais internas da espessura da curva e zona de transição 500 Hz estão no mesmo nível de microdureza apresentado pela região central da curva 2500 Hz. Assim as microdurezas médias das camadas mais internas da espessura de parede na curva e zona de transição 500 Hz são 7% a 8% superiores quando comparadas com a mesma região da espessura da curva 2500 Hz. O curvamento com frequência de 500 Hz obteve picos de microdureza mais elevados na parte externa da espessura, além de elevar os níveis médios de microdureza das camadas mais internas.

### 8.3.1. Propriedades Mecânicas e correlações

A partir dos dados de distribuição de tamanho de grão da austenita prévia, fração volumétrica, perfis de microdurezas (dos quais é possível estimar valores de limite de resistência) e propriedades mecânicas de tração, obtidas por ensaios mecânicos, buscou-se correlações que pudessem trazer informações sobre as diferenças de propriedades mecânicas após a aplicação de operações de curvamento a quente com diferentes parâmetros e também informações de processamento do material (curva) não aferidas diretamente.

Através da figura 84 buscou-se determinar a existência ou não de correlações entre o tamanho de grão da austenita prévia (associado a temperabilidade) e a microdureza obtida ao longo da espessura de parede das curvas.

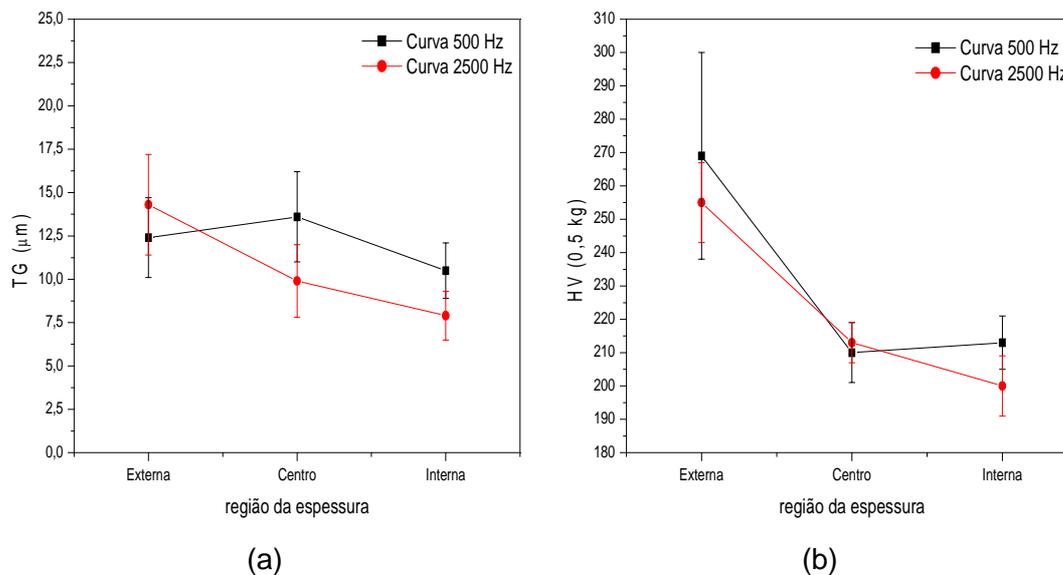


Figura 84 – Tamanho de grão da austenita prévia (a) microdurezas (b) ao longo da espessura de parede e para as curvas 2500 Hz e 500 Hz.

O gráfico da figura 84 associado ao gráfico de distribuição de microdurezas, figura 60a, após a realização de tratamentos térmicos com transformações de resfriamento contínuo a partir da variação da temperatura de austenitização (traz informação sobre o tamanho de grão austenítico) e meios resfriadores (introduz informação sobre taxas de resfriamento), explica a aparente falta de correlação entre o tamanho de grão austenítico e a distribuição de microdureza obtida para a curva 500 Hz. A partir de um tamanho de grão austenítico similar e condução de resfriamento final em meios com capacidades

diferentes de remoção de calor observa-se que a dureza final do material cairá quanto menos drástico for o resfriamento (figura 60a). Assim na figura 84 verifica-se que, a não correlação entre microdureza e tamanho de grão austenítico para o curvamento 500 Hz, traz informações sobre a redução das taxas de resfriamento ao longo da espessura de parede na curva.

Os gráficos da figura 85 revelam a evolução microestrutural da fração volumétrica de ferrita com segunda fase alinhada na espessura interna das curvas 2500 Hz e 500 Hz, associada ao tamanho de grão austenítico (aqui representando a temperabilidade) e microdurezas.

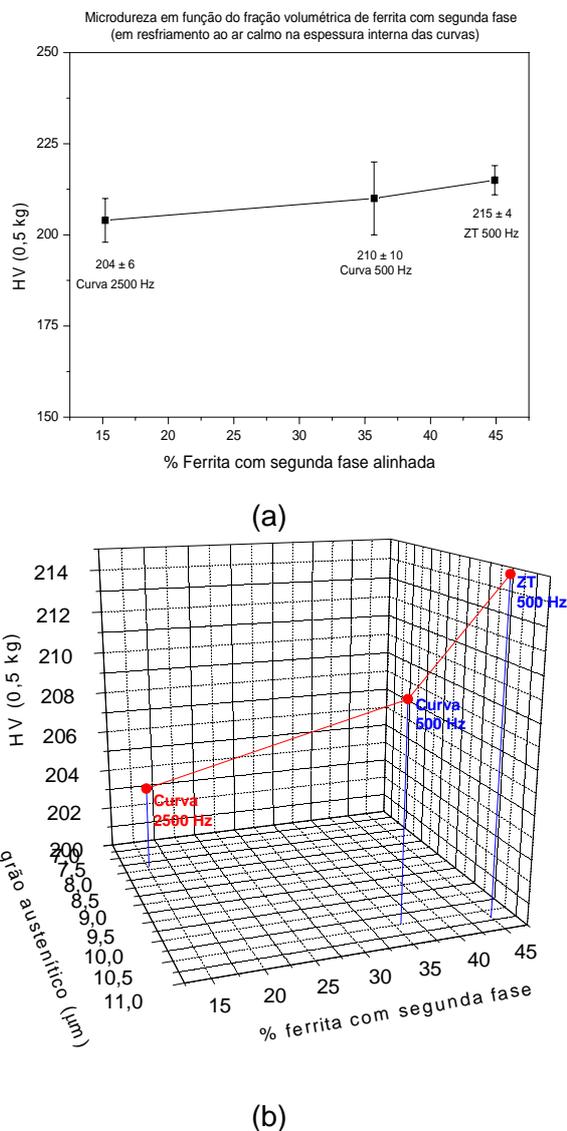


Figura 85 – Correlação entre microdureza, fração volumétrica de ferrita com segunda fase alinhada e tamanho de grão austenítico obtida para a espessura interna de parede nas curvas 2500 Hz e 500 Hz e zona de transição 500 Hz (resfriadas ao ar calmo a partir do estado austenítico).

Os gráficos das figuras 86 e 87 correlacionam percentual de ferrita com segunda fase alinhada, microdureza e limites de resistência estimados ao longo da espessura de parede. Os valores ensaiados para limites de escoamento e resistência e limites API também foram plotados.

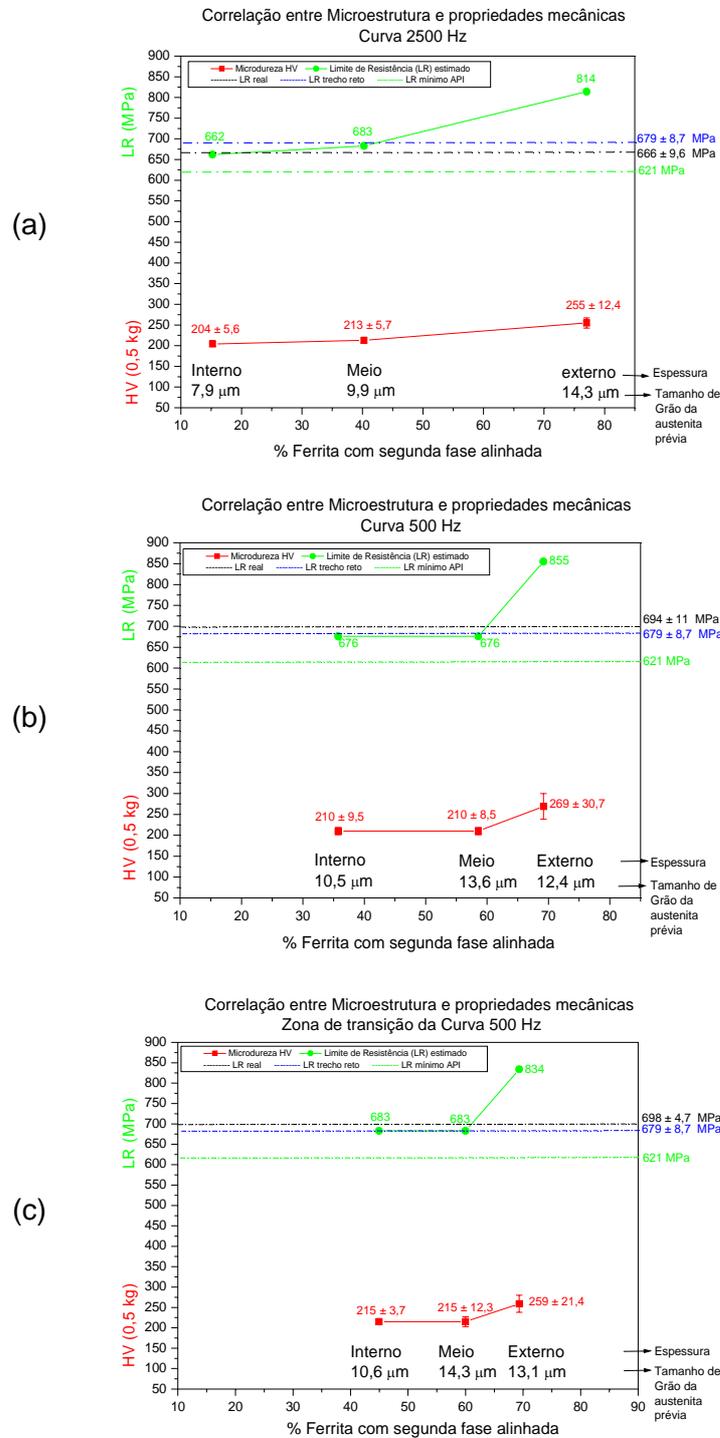
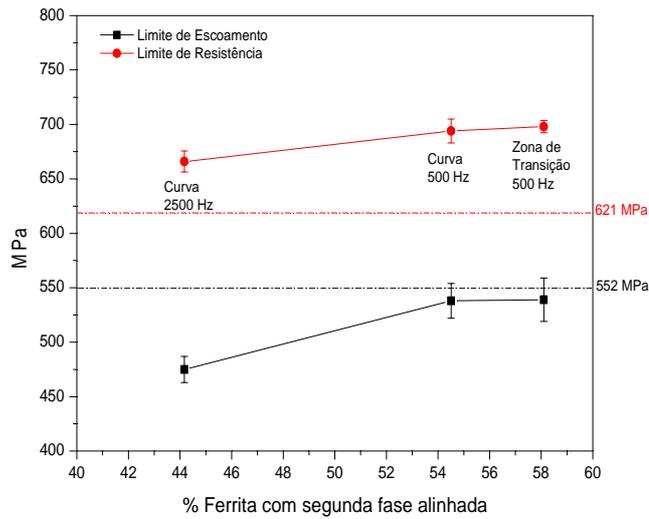
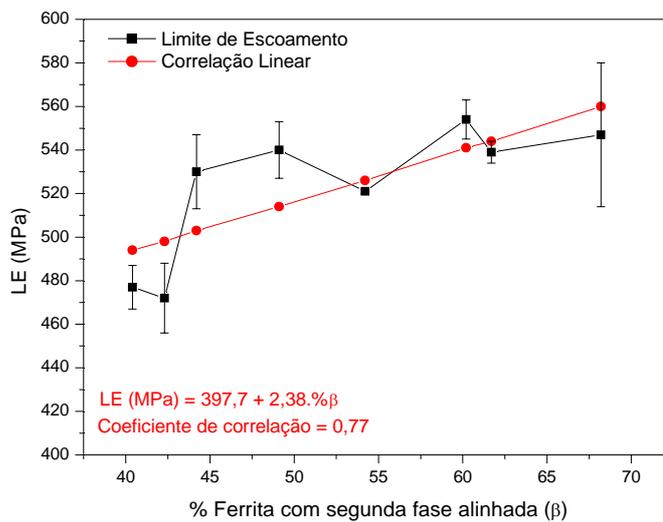


Figura 86 – Correlação entre fração volumétrica média de ferrita com segunda fase alinhada (através da espessura de parede nas curvas e zona de transição) com microdureza e limite de resistência estimado (estratificado em função da espessura). (a) Curvamento com parâmetro de frequência de 2500 Hz, (b) e (c) Curvamento com parâmetro de frequência de 500 Hz.



(a)



(b)

Figura 87 – Correlação entre fração volumétrica média de ferrita com segunda fase alinhada e propriedades mecânicas obtidas em ensaios de tração. (a) comparações entre curvamentos; (b) distribuição de valores de limite de escoamento em função da fração volumétrica de ferrita com segunda fase alinhada.

O gráfico da figura 87 mostra que a elevação da fração volumétrica de ferrita com segunda fase alinhada favorece os limites de escoamento e resistência do tubo de aço API X80 após operação de curvamento a quente.