4. Resultados

4.1. Determinação dos ciclos térmicos simulados

Para gerar as curvas dos ciclos térmicos da ZTA foram utilizados os parâmetros de soldagem e as propriedades térmicas mostradas nas **Tabela 3-4** e **Tabela 3-5** respectivamente. Quando introduzidos estes parâmetros de trabalho para o tipo de modelo escolhido, em nosso caso (Rykalin 3D), o software que controla a maquina Gleeble® 3800 gera duas curvas de ciclos térmicos como se mostra na Figura 4-1 (a). Um ciclo térmico gerado pelo software (programado) ao introduzir os parâmetros de soldagem e um ciclo térmico gerado fisicamente em um corpo de prova.

Pode ser observado que as duas curvas se encontram quase sobrepostas. No entanto na faixa de temperatura entre 800 e 500°C a curva originada da simulação física sofre um desvio como mostrado na Figura 4-1 (b). O desvio ocorre devido a uma possível transformação de fase causando uma alteração no Δ t8/5 e velocidade de resfriamento. Todas as curvas dos ciclos térmicos apresentadas neste trabalho, assim como os cálculos de seus parâmetros, pertencem a ciclos térmicos obtidos em simulações físicas.



Figura 4-1. Comparação dos ciclos térmicos programados e simulados (a), ampliação de ambos ciclos (b), gerados pelo modelo de curva Rykalin 3D,

A Figura 4-2 e Figura 4-3, mostram as curvas dos ciclos térmicos simulados para cada região da ZTA (RGGI- RGRRS- RGGRI- RGGRS), realizadas conforme foi citado no item 3.6. Cada corpo de prova experimentou um ciclo térmico de maneira independente para cada temperaturas de pico Tp2, onde cada temperatura, 1200, 1000, 800, 600°C, está associada a uma região, e aos aportes de calor de 1,2-2,5-3,0 e 4,0 kJ/mm respectivamente.

A **Tabela 4-1** mostra os códigos dos corpos de prova que representam uma determinada região da ZTA associado a uma determinada curva de ciclo térmico e aporte de calor pertencente ao sistema Nb-Cr.

Sistema	Aporte	Temp. Pico	Região da	Códigos/	Figura
	(KJ/mm)	°C	ZTA	Amostra	
		1200	RGGI	B1W7	
	1,2	1000	RGRRS	B1X7	Figura 4-2 (a)
		800	RGGRI	B1Y7	
		600	RGGRS	B1Z6	
		1200	RGGI	B2W5	
Nb-Cr	2,5	1000	RGRRS	B2X3	Figura 4-2 (b)
		800	RGGRI	B2Y8	
		600	RGGRS	B2Z9	
	3,0	800	RGGRI	B3Y1	Figura 4-2 (c)
	4,0	800	RGGRI	B4Y1	Figura 4-2 (d)

Tabela 4-1 Códigos das diferentes regiões da ZTA pertencente ao sistema Nb-Cr.

A **Tabela 4-2** mostra os códigos que representam uma determinada região da ZTA associado a uma determinada curva de ciclo térmico e aporte de calor pertencente ao sistema Nb-Cr-Mo.

Tabela 4-2 Códigos das diferentes regiões da ZTA pertencentes ao sistema Nb-Cr-Mo.

Sistema	Aporte	Temp. Pico	Região da	Código/	Figura
	(KJ/mm)	°C	ZTA	Amostra	
		1200	RGGI	A1W8	
	1,2	1000	RGRRS	A1X5	Figura 4-3 (a)
		800	RGGRI	A1Y8	
Nb-Cr-Mo		600	RGGRS	A1Z8	
		1200	RGGI	A2W7	
	2,5	1000	RGRRS	A2X8	Figura 4-3 (b)
		800	RGGRI	A2Y4	
		600	RGGRS	A2Z6	
	3,0	800	RGGRI	A3Y4	Figura 4-3 (c)
	4,0	800	RGGRI	A4Y2	Figura 4-3 (d)



Figura 4-2 Ciclos térmicos das regiões da ZTA, (RGGI), (RGRRS), (RGGRI) (RGGRS) para (a) 1,2 kJ/mm, (b) 2,5 kJ/mm, (c) 3,0 kJ/mm, (d) 4,0 kJ/mm para o sistema Nb-Cr.



Figura 4-3 Ciclos térmicos das regiões da ZTA, (RGGI), (RGRRS), (RGGRI) (RGGRS) para 1,2 kJ/mm (a), 2,5 kJ/mm(b), 3,0 kJ/mm(c), 4,0 kJ/mm (d) para sistema Nb-Cr-Mo.

4.2. Cálculos do tempo ∆t8/5 e velocidade de resfriamento

A partir das curvas dos ciclos térmicos foram calculados os dados da Tabela 4-3, onde se encontram resumidos os valores médios dos tempos e velocidades de resfriamentos dos 180 corpos de prova simulados, no intervalo de temperaturas de 800-500°C. A média calculada para o tempo e a velocidade de resfriamento foi obtida a partir de nove ciclos térmicos par cada região da ZTA e aporte de calor respectivamente.

Tabela 4-3 Valores meios do tempo e velocidades de resfriamento para os sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr.

		Nb-Cr-Mo		Nb-Cr	
H= 1,2 KJ/mm	Região	∆t (8/5) (s)	Resfriamento (℃/s)	Δt (8/5) (s)	Resfriamento (°C/s)
	RGGI	10.4±1.6	26.3±3.1	10.3±0.7	28.8±2.4
	RGRRS	11.2±1.5	24.3±2.9	12.1±1.5	22.4±3.1
	RGGRI	11.4±1.9	24.9±3.1	12.3±1.9	25.9±3.3
H= 2,5 KJ/mm	Região	∆t (8/5) (s)	Resfriamento (℃/s)	Δt (8/5) (s)	Resfriamento (°C/s)
	RGGI	17.4±1.7	16.2±2.1	16.5±1.4	17.0±1
	RGRRS	18.2±1.5	15.5±1.8	16.7±1.0	16.3±1
	RGGRI	19.9±1.0	15.2±1.9	16.8±1.5	16.0±1
H= 3,0 KJ/mm	Região	Δt (8/5) (s)	Resfriamento (℃/s)	Δt (8/5) (s)	Resfriamento (°C/s)
	RCCRI	20 0+1 /	1/ 5+2 1	17 6+1	15 5+1

H= 4,0	Região	Δt (8/5)	Resfriamento	Δt (8/5)	Resfriamento
KJ/mm		(s)	(°C/s)	(s)	(°C/s)
	RGGRI	23.3±0.5	12.5±1	22.0±1	13.8±1

4.3. Estudo da Influência do aporte de calor

Com o objetivo de fazer uma avaliação sobre a influência do aporte de calor na região RGGRI correspondente ao Tp2=800°C, foram agrupados os ciclos térmicos com aportes de calor de 1,2- 2,5- 3,0- 4,0 kJ/mm, pertencentes aos sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr. Os corpos de prova utilizados para representar o sistema Nb-Cr-Mo na Figura 4-4 (a) foram (A1Y8-A2Y4-A3Y4-A4Y2). Já para representar o sistema Nb-Cr na Figura 4-4 (b) foram empregados os Corpos (B1Y7-B2Y1-B3Y1-B4Y1).



Figura 4-4 Comparação dos ciclos térmicos simulados para diferentes aportes de calor, nos sistemas Nb-Cr-Mo (a), Nb-Cr(b), na RGGRI.

Como pode ser observado na Figura 4-4 cada aporte representa uma curva, porém existe uma variação no tempo e velocidade de resfriamento, conforme mostrado na Tabela 4-3

A Figura 4-5 mostra a influência do tempo de resfriamento das regiões (RGGI, RGRRS, RGGRI) com relação ao aporte de calor. Sendo que o aumento do aporte de calor aumenta o tempo de resfriamento $\Delta t8/5$.



Figura 4-5 influencia do aporte de calor no tempo de resfriamento (Δ t8/5), em aços Nb-Cr-Mo e Nb-Cr.

A Figura 4-6 mostra a influência do tempo de resfriamento da região (RGGRI Tp2=800°C) com relação ao aporte de calor, sendo que o aumento do aporte de calor leva ao aumento do Δ t8/5. A inclinação da curva diminui entre os aportes de calor de 2,5 a 3,0 kJ/mm. Isto pode ser consequência de variações de condutividade térmica nas temperaturas mais elevadas.



Figura 4-6 influencia do aporte de calor no tempo de resfriamento (Δ t 8/5), em aços Nb-Cr-Mo e Nb-Cr na (RGGRI).

Considerando os aportes de calor de 1,2 e 2,5 kJ/mm e sabendo que a velocidade de resfriamento é um parâmetro que tem um comportamento inverso ao $\Delta t8/5$ com relação ao aporte de calor (**Figura 4-7**). Para um maior aporte térmico ocorre uma redução da velocidade de resfriamento.



Figura 4-7 Influência do aporte de calor na velocidade de resfriamento em aços Nb-Cr-Mo e Nb-Cr.

A Figura 4-8 mostra a influência da velocidade de resfriamento para aportes de calor de (1,2- 2,5- 3,0- 4-0) kJ/mm na região (RGGRI Tp2=800°C) para os sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr.



Figura 4-8 Influência do aporte de calor na velocidade de resfriamento em aços Nb-Cr-Mo e Nb-Cr na (RGGRI).

4.4.Caracterização metalográfica

4.4.1. Macrografia da ZTA

A Figura 4-9 apresenta a macrografia obtida da ZTA real e simulada, utilizando um mosaico de 358 imagens. O comprimento da ZTA foi determinado considerando o comprimento médio total da ZTA real de 2,65 mm, e o comprimento médio de uma ZTA simulada 7,37 mm conforme mostrado na Figura 4-9.



Figura 4-9 Macrografia da ZTA real (a) e da ZTA simulada (b), realizadas por um mosaico (aumento de 20X), (nital 2%).

4.4.2. Caracterização Microestrutural do metal base

A microestrutura do metal de base na condição de como laminado, apresenta uma microestrutura de matriz de ferrita poligonal (FP), quase-poligonal (FQP), bainita, grãos alongados na direção de laminação (não necessariamente grãos achatados), microfases (MF) agregados eutetoides de ferrita e carbonetos, conforme mostrado na Figura 4-10.



Figura 4-10 Microestrutura do metal de base na condição de como recebido dos sistemas Nb-Cr-Mo (a) e Nb-Cr (b). todas as imagens foram obtidas com aumento de 500x, (Nital 2%).

4.4.3. Caracterização microestrutural das diferentes regiões ZTA por MO

Na Figura 4-11 se mostra as imagens obtidas por microscopia ótica (MO) das diferentes regiões da ZTA simuladas e reais pertencentes aos sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr.

Comparando as imagens simuladas para cada região da ZTA correspondentes aos sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr, e para o aporte de calor de 1,2 kJ/mm Figura 4-11 (a) até (h), observa-se que se apresentam microestruturas similares. Por microscopia ótica não é possível se observar diferenças significativas em função da adição do Mo. Quando comparada a microscopia obtida em uma solda real para o mesmo aporte de calor Figura 4-11 (i) até (l) com aquela obtida por simulação Figura 4-11 (a) até (d) para o mesmo sistema, é interessante observar a similaridade das microestruturas obtidas. Este resultado

indica que a simulação produziu microestruturas idênticas e consequentemente correspondem as temperaturas de pico determinadas na simulação.

A Figura 4-11 (a), (e) (i) correspondem a uma temperatura de pico de 1200°C, promovendo grãos grosseiros, constituídos de ferrita bainítica (FB) e bainita granular (BG). Esta região foi denominada (RGGI) e se considera que devido à proximidade da temperatura de pico de Tp1= 1350°C, estes grãos grosseiros permanecem inalterados quando reaquecidos a 1200°C.

O reaquecimento a 1000°C acima de Ac3 promove a recristalização total da austenita, formando grãos finos (Figura 4-11 (b), (f), (j)). Esta região foi denominada de (RGRRS), e se pode observar a presença de ferrita acicular (FA), ferrita poligonal (FP), e ferrita quase poligonal (FQP).

O reaquecimento a 800°C (entre Ac1 e Ac3) promove a recristalização parcial da austenita, onde a nucleação ocorre nos contornos de grão da austenita previa enriquecida de carbono (Figura 4-11 (c), (g), (k)). Podemos observar a presença de ferrita bainítica e um tamanho de grão grosseiro.

A microestrutura obtida após reaquecimento a Tp2=600°C figura (d), (h) e (l), apresenta grãos grosseiros heterogêneos, ferrita bainítica (FB) na forma de ripas paralelas entre si, bainita granular (BG), ferrita poligonal (FP). Obrseva-se que a microestrutura obtida após o reaquecimento a 600°C, Figura 4-11 (d) e (h) é muito semelhante aquela apresentada após o reaquecimento a 1200°C (Figura 4-11 (a), (e)). As microestruturas obtidas por simulação na Gleeble pertencente ao sistema Nb-Cr-Mo Figura 4-11 (i), até (l) produziu microestruturas semelhantes aquelas de uma ZTA real Figura 4-11 (i), (j), (k), (l), indicando que as temperaturas de pico utilizadas foram idênticas àquelas que ocorrem em uma solda real.



Figura 4-11 Microestruturas das diferentes regiões da ZTA, as imagens (a), (e), (i), pertencem a (RGGI); as imagens (b), (f), (j), pertencem a (RGRRS); as imagens (c),(g),(k); pertencem a (RGGRI) e as imagens (d), (h), (l) pertencem (RGGRS) para 12 kJ/mm, imagens obtidas com aumento de 500 x, (Nital 2%).

A Figura 4-12 e a Figura 4-13 exibem as regiões da ZTA simuladas com um aporte de calor de 2,5 kJ/mm nos sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr. As imagens da Figura 4-12 (a) e (e) pertencentes a (RGGI), apresentam uma microestrutura ferrita bainítica (FB) na forma de ripas paralelas entre si, ferrita poligonal (FP), ferrita quase-poligonal (FQP) e bainita granular (BG). A região (RGRRS) (Figura 4-12 (b) e (f)) apresenta tamanho de grão fino devido a recristalização e se encontra composta basicamente de ferrita acicular (FA), ferrita poligonal (FP) e quasepoligonal (FQP). Já a região (RGGRI) (Figura 4-13 (c) e (g)) apresenta contornos de grão é muito mais grosseiro que nas imagens mostradas na (RGGRI) da Figura 4-11. A região (RGGRS), (Figura 4-13 (d) e (h)) apresenta bainita granular e ferrita bainítica na forma de ripas paralelas entre si, com contornos de grão de austenita previa.



Figura 4-12 Microestruturas das diferentes regiões da ZTA simuladas a 2,5 kJ/mm, as imagens (a), (e), pertencem a (RGGI); as imagens (b), (f), pertencem a (RGRRS); para 2,5 kJ/mm, imagens obtidas com aumento de 500x, (Nital 2%).



Figura 4-13 Microestruturas das diferentes regiões da ZTA pertencentes a 2,5 kJ/mm, as imagens (c), (g), pertencem a (RGGRI) e as imagens (d), (h), pertencem (RGGRS) para 2,5 kJ/mm, imagens obtidas com aumento de 500x, (Nital 2%).

Como mencionado anteriormente os aportes de calor de 3,0 e 4,0 kJ/mm foram utilizados para caracterizar a região de grãos grosseiros reaquecidos intercriticamente (RGGRI), sendo que um aumento do aporte de calor de 3,0 até 4,0 kJ/mm levou a um aumento do tamanho de grão.

A região intercrítica é uma região parcialmente transformada, onde parte da microestrutura foi transformada em austenita durante o reaquecimento do ciclo térmico. Assim, o contorno de grão da austenita prévia (Figura 4-14 e Figura 4-15), é enriquecido em carbono e microfases podendo formar nesta região ferrita bainítica em forma de ripas paralelas si.



Figura 4-14 Microestruturas da (RGGRI) da ZTA simulada para 3,0 kJ/mm, (a) sistema Nb-Cr-Mo e (b) sistema Nb-Cr, aumento de 500x nital (2%).



Figura 4-15 Microestruturas da (RGGRI) da ZTA simulada para 4,0 kJ/mm, (a) sistema Nb-Cr-Mo e (b) sistema Nb-Cr, aumento de 500x nital (2%).

4.5.Caracterização microestrutural do constituinte austenita martensita (AM) por MEV

4.5.1. Metal de base (MB)

Para revelar a presença do microconstituinte AM, no (MB) e (ZTA) foi utilizado o ataque seletivo denominado Le Pera modificado citado na **Tabela 3-10**, a qual permitiu distinguir a presença do AM dos carbonetos, além de diferenciar o AM massivo, do parcialmente decomposto. A Figura 4-16 mostra a micrografia dos sistemas Nb-Cr-Mo (a) e Nb-Cr (b) obtida por MEV, mostrando a presença do microconstituinte AM no metal base.



Figura 4-16 Metal base, sistema Nb-Cr-Mo (a), Nb-Cr (b). Aumento 3000X, microconstituinte AM nas formas massiva e alongada. (Lepera modificado)

4.5.2. Zona termicamente afetada (ZTA)

As diferentes regiões da ZTA dos aços Nb-Cr-Mo e Nb-Cr observadas por microscopia ótica apresentam microestrutura complexa, heterogênea e refinada, onde os aumentos no (MO), da ordem de 500X não foram suficientes para resolver a presença do AM de forma inequívoca.

Detalhes (Figura 4-17) dos dois tipos de morfologia presente nas diferentes regiões da ZTA podem ser observados a um aumento de 20000X, em duas morfologias : Alongado (tipo I) e massivo (tipo II).



Figura 4-17 Morfologias do microconstituinte AM presente nas regiões da ZTA, alongado (Tipo I), massivo (Tipo II). Aumento 20000x. (Lepera modificado)

De modo geral, nas figuras Figura 4-18 até Figura 4-22, os microconstituintes AM presente nas diferentes regiões da ZTA, se encontram entre os grãos bainíticos, dispersos na matriz ferrítica ou nos contornos de grão da austenita prévia, nas formas já citadas (massivo ou alongado).

A presença de AM nas diferentes regiões da ZTA é avaliada para o aporte de 1,2 KJ/mm comparando as regiões das ZTA simulada com a ZTA real Figura 4-18, imagens (a-d) e imagens (i-l) respectivamente.

Nas imagens (a), (e), (i), da Figura 4-18 a região (RGGI) obtida para um aporte de 1,2 kJ/mm reaquecida a uma temperatura acima de Ac3, a formação do microconstituinte AM ocorre para uma velocidade de resfriamento de 26,3 °C/s no sistema Nb-Cr-Mo e 28,8 °C/s no sistema Nb-Cr. Nesta região o AM se encontra parcialmente decomposto e disperso na matriz ferrítica ou na forma alongada. Na região (RGRRS), a velocidade de resfriamento na qual ocorre a formação do AM é de 24,3 °C/s para o sistema Nb-Cr-Mo e 22,4 °C/s no sistema Nb-Cr. Esta região foi reaquecida até temperatura de 1000°C permitindo a formação de grãos finos em função da recristalização, conforme mostrado nas imagens (b), (f), (j), da Figura 4-18. A presença do AM se apresenta preferencialmente na forma massiva, dispersa na matriz ferrítica. As imagens (c), (g), (k) da Figura 4-18, pertencem a região (RGGRI) reaquecida entre as temperaturas de Ac1 e Ac3. Nesta região, o constituinte AM encontra-se presente nos contornos de grão da austenita prévia na forma massiva e alongada na matriz ferritica. A velocidade de resfriamento na qual ocorreu a formação do AM foi de 24,9 °C/s para o sistema Nb-Cr-Mo e 25,9 °C/s no sistema Nb-Cr. A região (RGGRS) Figura 4-18 (d), (h), (l) reaquecida a uma temperatura abaixo de Ac3, o microconstituinte AM se encontra preferencialmente na forma alongada.



Figura 4-18 Caracterização do microconstituinte AM nas regiões da ZTA obtidas pelo (MEV), as imagens (a), (e), (i), pertencem a (RGGI); as imagens (b), (f), (j), pertencem a (RGRRS); as imagens (c), (g), (k); pertencem a (RGGRI) e as imagens (d), (h), (l) pertencem (RGGRS) para 1,2 kJ/mm. Aumento de 3000x. (Lepera modificado).

Para um aporte de calor de 2,5 kJ/mm a Figura 4-19 e Figura 4-20 exibe a caracterização do microconstituinte AM no MEV nas diferentes regiões da ZTA obtidas com um aporte de calor de 2,5 kJ/mm. As imagens da Figura 4-19 (a), (b), e Figura 4-20 (c), (d) representam as diferentes regiões da ZTA do sistema Nb-Cr-Mo, já as imagens das Figura 4-19 (e), (f) e Figura 4-20 (g), e (h) pertencem ao sistema Nb-Cr.

A morfologia do constituinte AM nas amostras ensaiadas com aportes de calor de 2,5 kJ/mm foram encontradas na forma massiva e alongada nas diferentes regiões da ZTA.



Figura 4-19 Caracterização microestrutural das diferentes regiões da ZTA obtidas pelo (MEV), as imagens (a), (e), pertencem a (RGGI); as imagens (b), (f), pertencem a (RGRRS) para 2,5 kJ/mm. Aumento de 3000x. (Lepera modificado).

Na região (RGGI) Figura 4-19 (a), (e) reaquecida acima da temperatura crítica Ac3, (1200°C) a formação do microconstituinte AM ocorre a uma velocidade de resfriamento de 16,2 °C/s no sistema Nb-Cr-Mo e 17,0 °C/s no sistema Nb-Cr. A presença do microconstituinte AM se encontra distribuída aleatoriamente na matriz ferrítica e na forma alongada, assim como uma pequena quantidade de AM massivo nos contornos de grão.

Na região (RGRRS) Figura 4-19 (b), (f), (1000°C) a velocidade de resfriamento na qual ocorre a formação do AM é de 15,5 °C/s para o sistema Nb-Cr-Mo e 16,3 °C/s no sistema Nb-Cr. Esta região foi recristalizada apresentando um tamanho de grão fino, devido ao crescimento do grão relativamente lento, ajudado pela presença de elementos de liga. Pelo fato de ser uma região completamente recristalizada a presença do AM ocorre de forma dispersa em toda a matriz, e preferencialmente na forma massiva.

Na região (RGGRI) Figura 4-20 (c), (g) reaquecida entre as temperaturas críticas de Ac1 e Ac3, (800°C), a formação do microconstituinte AM ocorre a uma velocidade de resfriamento de 15,2°C/s no aço Nb-Cr-Mo e 16,0°C/s no aço Nb-Cr. Nesta temperatura (800°C) o carbono e as microfases se formam preferencialmente no contorno de grão austenítico devido ao curto tempo de difusão. Assim o AM é formado preferencialmente no contorno de grão da austenita previa enriquecido com carbono. A morfologia do constituinte AM na RGGRI se encontra basicamente na forma massiva.

Na região (RGGRS) Figura 4-20 (d), (h) reaquecida abaixo de Ac3, (600°C), a presença do microconstituinte AM se encontra preferencialmente na forma alongada y disperso na matriz ferrítica. Basicamente o reaquecimento até uma temperatura abaixo da temperatura de recristalização do aço API X80 induz a que a morfologia do constituinte AM seja a mesma do primeiro passe.



Figura 4-20 Caracterização microestrutural das diferentes regiões da ZTA obtidas pelo (MEV), as imagens (c), (g), pertencem a (RGGRI) e as imagens (d), (h), pertencem (RGGRS) para 2,5 kJ/mm. Aumento de 3000x. (Lepera modificado).

A Figura 4-21 e Figura 4-22 mostra a presença do constituinte AM na (RGGRI), para o sistema Nb-Cr-Mo e Nb-Cr realizados com aportes de calor de 3,0 kJ/mm e 4,0 kJ/mm respectivamente. A presença do microconstituinte AM mantém a mesma morfologia das regiões intercríticas anteriores, sendo massiva nos contornos de grão da austenita prévia e uma pequena quantidade alongada na matriz ferrítica. A formação do AM para um aporte de calor de 3,0 kJ/mm ocorreu a uma velocidade de resfriamento de 14,5 °C/s no sistema Nb-Cr-Mo e 15,5 °C/s no sistema Nb-Cr. Já para um aporte de calor de 4,0 kJ/mm a velocidade de resfriamento foi de 12,5°C/s no sistema Nb-Cr-Mo e 13,8°C/s no sistema Nb-Cr.



Figura 4-21 Caracterização microestrutural do microconstituinte AM na (RGRRI) para aportes de calor de 3.0 kJ/mm, aumento 3000X, (Lepera modificado).



Figura 4-22 Caracterização microestrutural do microconstituinte AM na (RGRRI) para aportes de calor de e 4.0 KJ/mm, aumento 3000X, (Lepera modificado).

4.5.3. Comparação do constituinte AM entre MO e MEV

Com o objetivo de revelar a presença do microconstituinte AM por microscopia ótica, foi realizada uma comparação das imagens obtidas por MO e MEV a 1000x. Esta comparação foi realizada somente para o sistema Nb-Cr-Mo para o aporte de H=2,5 kJ/mm. A presença do microconstituinte AM sinalado pelas setas (RGGI) imagens (a), (e) **Figura 4-23**, e (RGGRS) imagens (d), (h) **Figura 4-24**, pode ser observada fundamentalmente com a bainita granular (BG), ou presente na matriz ferrítica preferencialmente na forma alongada, a qual devido a proximidade das caras do constituinte (AM) e pelo baixo aumento não é possível distinguir claramente. O AM presente na região (RGRRS) apresenta morfologia massiva **Figura 4-23** (b) (f), e na região (RGGRI) apresenta os dois tipos de morfologia (alongada e massiva), onde o AM se encontra preferencialmente no contorno de grão da austenita previa enriquecida de carbono **Figura 4-24** (c), (g).



Figura 4-23 Caracterização do AM por MO e MEV das regiões, RGGI (a), (e), RGRRS (b(f)), da ZTA simulada pertencente ao sistema Nb-Cr-Mo, imagens obtidas com um aumento de (1000x), (Lepera modificado).

Os carbonetos, nitretos e carbonitretos são difíceis de visualizar por MO por seu pequeno tamanho, no entanto a presença destes compostos pode se encontrar associado ao aço API em estudo. Para determinar a presença do constituinte AM por microscopia ótica (MO), e microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi utilizado o ataque de Lepera modificado.

As imagens apresentadas na **Figura 4-23** e **Figura 4-24**, pertencem aos corpos de prova A2W9, A2X8, A2Y6, A2Z9 pertencentes ao sistema Nb-Cr-Mo.



Figura 4-24 Caracterização do AM por MO e MEV das regiões, RGGRI (c)(g), RGGRS (d)(h), da ZTA simulada pertencente ao sistema Nb-Cr-Mo, imagens obtidas com um aumento de (1000x), (Lepera modificado).

4.6. Ensaios de impacto

Os ensaios de impacto (Charpy a -40 e -60 °C) foram realizados conforme citado no item 3.10. A Tabela 4-4 mostra os valores médios das energias absorvidas nas diferentes regiões da ZTA para os sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr pertencentes aos aços APIX80.

		Nb-C	Cr-Mo	Nb	-Cr
	Temperatura				
	Pico (Tp2)	Energia (J) a	Energia (J) a	Energia (J) a	Energia (J) a
1,2 kJ/mm	(°C)	-40°C	-60°C	-40°C	-60°C
	600	253	31	212	147
	800	11	13	27	10
	1000	187	37	168	42
	1200	223	20	194	13
2,5 kJ/mm	600	11	28	55	34
	800	9	7	25	8
	1000	194	19	234	28
	1200	25	22	226	10
3,0 kJ/mm	800	15	12	13	13
4,0 kJ/mm	800	11	8	14	12

Tabela 4-4 Valores médios resultantes dos ensaios de impacto Charpy-V, para as diferentes regiões da ZTA pertencentes aos sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr.

A partir dos valores médios de energia absorvida apresentados na Tabela 4-4 foram plotados os gráficos da **Figura 4-25**, onde se relaciona a segunda temperatura de pico, correspondente a uma região da ZTA com a energia absorvida.

Todas as regiões da ZTA simulada tanto para 1,2 como para 2,5 kJ/mm apresentam baixa energia absorvida quando ensaiados a -60°C, no entanto para os ensaios a -40°C a região (RGGRI) apresenta a menor energia absorvida, independente do aporte de calor, indicando neste caso que a (RGGRI) é a região considerada ZFL (zona frágil localizada). Esta região reaquecida até uma segunda temperatura de pico (800°C) apresenta baixa energia absorvida possivelmente por uma maior presença do constituinte AM respeito às outras regiões da ZTA, sendo a presença do AM apresentada basicamente no contorno de grão da austenita previa.



Figura 4-25 Tenacidade das diferentes regiões da ZTA caracterizadas por suas temperaturas de pico, pertencentes aos sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr para aportes de calor de (a) 1,2 kJ/mm e (b) $2,5 \text{ kJ/mm a} -40 \text{ e} -60 \degree$ C.

Comparando os valores de energia absorvida para os aportes de calor estudados para a RGGRI (Tp2= 800° C), (**Figura 4-26**) todos apresentam baixa energia absorvida para os ensaios de -40 e -60°C. No entanto, para esta região as energias mais altas foram para aportes de calor de 1,2 e 2,5 kJ/mm a -40°C sendo estas de (27 e 25 J) para o Nb-Cr-Mo respectivamente.



Figura 4-26 Influência do aporte de calor a tenacidade da RGGRI da ZTA pertencentes aos sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr para aportes de calor de 1,2 kJ/mm, 2,5 kJ/mm, 3,0 k/mm e 4,0 kJ/mm, a -40 e -60 °C.

4.6.1.Análise fractográfica

O critério utilizado para análise dos corpos de prova Charpy foram os valores de energia de impacto máxima e mínima para uma determinada temperatura e condição de simulação de soldagem. As superfícies de fratura foram analisadas macrograficamente (fotografia) e fractograficamente (MEV) a um aumento de 1000X. A identificação dos corpos de prova está em acordo com a tabela 3-8, e a superfície de fratura analisada foi aquela a -40°C.

Na **Figura 4-27** (a) até (d) estão apresentadas as superfícies de fratura dos corpos de prova da região (RGGRS) da ZTA pertencentes aos sistemas Nb-Cr-Mo. Observa-se que as energias de impacto pertencente ao aporte de calor de 1,2 kJ/mm são maiores que as obtidas nos corpos de prova ensaiados a 2,5KJ/mm.

As diferenças em tenacidade (máxima e mínima) para corpos de prova dos sistemas (Nb-Cr-Mo e Nb-Cr) obtidos para a mesma condição de soldagem, (aporte de calor de 1,2KJ/mm **Figura 4-27** (a)/(b) e **Figura 4-28** (e)/(f)) se encontram associados a uma deformação plástica marcada pela expansão lateral do corpo de prova o que caracteriza um comportamento de fratura dúctil, onde a análise por (MEV) revela uma superfície com presença de microcavidades dúcteis (alvéolos ou dimples), possivelmente associada a presença de inclusões não metálicas.

Na **Figura 4-27** (c)/(d) e **Figura 4-28** (g)/(h) estão apresentadas as superfícies de fratura pertencentes aos sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr, respectivamente onde se

observa que, para o aporte de calor de 2,5KJ/mm apresentam morfologia de fratura de clivagem, indicando que comparativamente ao aporte de calor de 1,2KJ/mm para a mesma região da ZTA(RGGRS) ocorre uma tendência a fragilização em ambos sistemas, sendo esta tendência maior para o sistema Nb-Cr.



Figura 4-27 Fractografía dos Cp´s ensaiados na região (RGGRS) pertencente ao sistema Nb-Cr-Mo representando as energias máximas e mínimas a 1000x.



Figura 4-28 Fractografía dos Cp´s ensaiados na região (RGGRS) pertencente ao sistema Nb-Cr representando as energias máximas e mínimas a 1000x.

Na Figura 4-29 e Figura 4-30 estão apresentadas as superfícies de fratura dos corpos de prova da região (RGGRI) da ZTA pertencentes aos sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr, com energias máximas e mínimas (esquerda e direita) respectivamente, com exceção da superfície do sistema Nb-Cr-Mo para 1,2 kJ/mm a -40°C que apresenta a mesma energia. A Figura 4-29 e Figura 4-30 (a) até (h) mostram que as

superfícies de fratura dos sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr pertencentes aos aportes de calor de 1,2 e 2,5 KJ/mm as quais apresentam pouca ou nenhuma deformação plástica, apresentando uma superfície de fratura relativamente plana, devido a baixa energia absorvida, característica de uma fratura frágil. As imagens obtidas por MEV revelam que a morfologia de fratura foi clivagem.



Figura 4-29 Fractografía dos Cp´s ensaiados na região (RGGRI), pertencente ao sistema Nb-Cr-Mo representando as energias máximas e mínimas a 1000x.



Figura 4-30 Fractografía dos Cp´s ensaiados na região (RGGRI ZTA), pertencente ao sistema Nb-Cr representando as energias máximas e mínimas a 1000x.

A **Figura 4-31** e **Figura 4-32** mostra as superfícies de fratura dos corpos de prova pertencentes a região RGRRS. Todos os corpos de prova independente da temperatura de ensaio e aporte utilizado, experimentaram uma grande deformação plástica, dado pela expansão lateral do corpo de prova, associado a uma elevada

absorção de energia, característico de uma fratura dúctil, já nas superfícies de fratura examinadas por microscopia eletrônica, observa-se regiões com microcavidades grosseiras e finas (alvéolos) possivelmente pelo reaquecimento dado pelos ciclos térmicos.



Figura 4-31 Fractogáfia dos Cp´s ensaiados na região (RGRRS), pertencente ao sistema Nb-Cr-Mo representando as energias máximas e mínimas a 1000x.



Figura 4-32 Fractogáfia dos Cp´s ensaiados na região (RGRRS), pertencente ao sistema Nb-Cr representando as energias máximas e mínimas a 1000x.

Na **Figura 4-33** (a) até (d) estão apresentadas as superfícies de fratura dos corpos de prova da região (RGGI) da ZTA pertencentes aos sistemas Nb-Cr-Mo, onde se observa que para esta região a mudança do aporte de calor de 1,2 KJ/mm para 2,5KJ/mm, promove uma fragilização. No entanto esta fragilização não



ocorre para o sistema Nb-Cr indicando que a presença do Mo leva a uma redução da tenacidade para esta região.

Figura 4-33 Fractogáfia dos Cp´s ensaiados na região (RGGI), pertencente ao sistema Nb-Cr-Mo representando as energias máximas e mínimas a 1000x.



Figura 4-34 Fractogáfia dos Cp´s ensaiados na região (RGGI), pertencente ao sistema Nb-Cr representando as energias máximas e mínimas a 1000x.

4.6.2. Analise da fratura interna das trincas

Os ensaios de impacto Charpy a -40 e -60 °C foram realizados conforme citado no item 3.10. Após de realizar os ensaios de impacto Charpy os corpos foram analisados conforme descrito no item 3.11.1 com o objetivo de observar trincas internas como serão mostradas nas **Figura 4-35**, **Figura 4-35** e **Figura 4-35**.

A partir das imagens da **Figura 4-35** obtidas por MO e MEV é possível observar trincas secundárias pertencentes a RGGI do sistema Nb-Cr-Mo, as quais se encontram associados a uma microestrutura de ferrita bainítica na forma de ripas paralelas entre sim, com presença de constituinte AM na forma alongada como indicado pelas (setas). Na bainita granular o constituinte AM encontra-se massivo (setas).

Também pode ser observado (**Figura 4-35**) que a trinca secundária é transgranular tanto os grãos ferriticos bainíticos (os feixes) quanto os grãos bainíticos granulares. A fratura transgranular geralmente se encontra associado a um tipo de fratura por clivagem.



Figura 4-35 Trincas secundarias pertencentes a (RGGI) por microscopia ótica (MO) 500X e microscopia eletrônica de varredura (MEV) 2000X, Nital 2%.

A imagem da **Figura 4-36** pertencente a região (RGRRS) do sistema Nb-Cr-Mo, mostra a propagação da trinca secundaria ora transgranular, ora intergranular. Na região intergranular da trinca (dentro do circulo) esta muda de direção ao encontrar com alguns grãos de ferrita de tamanho refinado, o que favorece a uma maior absorção de energia e elevação da tenacidade ao entalhe. Também pode se observar que a presença do constituinte AM (setas) se encontra na forma massiva associado a grãos finos de ferrita acicular (FA), ferrita poligonal (FP) e ferrita quase poligonal (FQP).



Figura 4-36 Trincas secundarias pertencentes a (RGGI) por microscopia ótica (MO) 500X e microscopia eletrônica de varredura (MEV) 2000X, Nital 2%.

A imagem da **Figura 4-37** pertencente a região (RGGRI) do sistema Nb-Cr-Mo mostra que a propagação da trinca secundaria ocorreu de forma intergranular. Nesta região o constituinte AM se encontra da forma massiva preferencialmente nos contornos de grão da austenita previa. A maior quantidade de carbono no constituinte AM pode ter favorecido também a nucleação dessas trincas.



Figura 4-37 Trincas secundarias pertencentes a (RGGI) por microscopia ótica (MO) 500X e microscopia eletrônica de varredura (MEV) 2000X, Nital 2%.

4.7. Ensaios de microdureza Vickers (HV1kg) nas regiões da ZTA real

Os valores de microdureza do metal de base foram obtidos a partir de uma média de 15 pontos, sendo de 205.4±7.03 para o sistema Nb-Cr-Mo e de 190±6.48 para o sistema Nb-Cr.

Os valores médios de microdureza para o sistema Nb-Cr-Mo na região de 1,2KJ/mm (**Tabela 4-5**) foram obtidos a partir dos perfis de microdureza citado no item 3-10.

Região	Vickers (HV)		
(RGGI)	(239,20 ± 7,1)		
(RGRRS)	(230,31 ± 5,0)		
(RGGRI)	(253,07 ± 6,1)		
(RGGRS)	(236,11 ± 4,3)		

Tabela 4-5 Resultados de microdureza do sistema (Nb-Cr-Mo)

4.8. Ensaios de microdureza Vickers (HV1kg) para as regiões simuladas

Os valores médios de microdureza das diferentes regiões da ZTA para o sistema Nb-Cr-Mo e Nb-Cr foram obtidos a partir dos perfis de microdureza citado no item 3-1, e são mostrados na Tabela 4-6, considerando dezesseis (16) corpos de prova para cada sistema, aporte de calor e temperatura de pico respectivamente.

Os valores máximos de microdureza tanto para o sistema Nb-Cr-Mo como para o sistema Nb-Cr, foram encontrados para a região RGGRI, para ambos aportes utilizados 1,2 e 2,5 KJ/mm **Tabela 4-6**

		Nb-Cr	-Mo	Nb-Cr			
		H=1,2KJ/mm	H=2,5KJ/mm	H=1,2KJ/mm	H=2,5KJ/mm		
Tp2	Região	Microdureza (HV)	Microdureza (HV)	Microdureza (HV)	Microdureza (HV)		
1200	(RGGI)	217,30 ± 9,42	210,00 ± 5,00	216,83 ± 6,45	204,66 ± 5,38		
1000	(RGRRS)	208,21 ± 5,80	205,05 ± 5,60	201,38 ± 5,19	203,33 ± 2,67		
800	(RGGRI)	234,81 ± 10,48	224,10 ± 5,27	228,24 ± 6,39	219,79 ± 5,49		
600	(RGGRS)	216,50 ± 6,84	214,03 ± 7,90	208,45 ± 5,29	203,07 ± 6,29		

Tabela 4-6 Valores médios da microdureza para o sistema Nb-Cr-Mo e Nb-Cr.

A **Figura 4-38** mostra o mapeamento dos valores médios de microdureza para cada uma das regiões da ZTA pertencentes ao sistema Nb-Cr-Mo e Nb-Cr. Observa-se que o valor máximo de microdureza sempre foi encontrado na região (RGGRI).



Figura 4-38 Mapeamento da microdureza nas diferentes regiões da ZTA para o sistema (a) Nb-Cr-Mo, (b) Nb-Cr.

A influência do tempo de resfriamento na microdureza na (RGGRI) para os sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr é mostrada na Tabela 4-7. Observa-se que um aumento do tempo de resfriamento associado a um aumento do aporte de calor induz a uma diminuição da microdureza na região (RGGRI) como é mostrado na **Figura 4-39**.

Nb-Cr-Mo Nb-Cr $\Delta \tau 8/5$ $\Delta \tau 8/5$ Velocidade de н Microdureza Velocidade de Microdureza (KJ/mm) resfriamento(°C/s) (s) (HV) Resfriamento(°C/s) (s) (HV) 25,9 1,2 11,40 234,81±10,41 24,9 12,30 228,24±6,39 16,0 2,5 224,10±5,27 15,2 219,79±5,49 18,00 15,80 15,5 3,0 20,00 219,14±7,94 14,5 17,60 209,00±6,64 13,8 216,71±4,56 4,0 12,5 200,00±9,50 23,30 22,00

Tabela 4-7 Influência do tempo de resfriamento na dureza na (RGGRI), para o sistema Nb-Cr-Mo e Nb-Cr.

A velocidade de resfriamento possui uma influencia inversa ao tempo de resfriamento. A **Figura 4-40** mostra que a microdureza aumenta com o aumenta

com o aumento da velocidade de resfriamento e diminui com o aumento do tempo de resfriamento.



Figura 4-39 Influencia do tempo de resfriamento na microdureza.



Figura 4-40 influencia da velocidade de resfriamento na microdureza.