

$V_c = 100 \text{ m/min, } ap = 2 \text{ mm, } fz = 0,2 \text{ mm/dente.}$

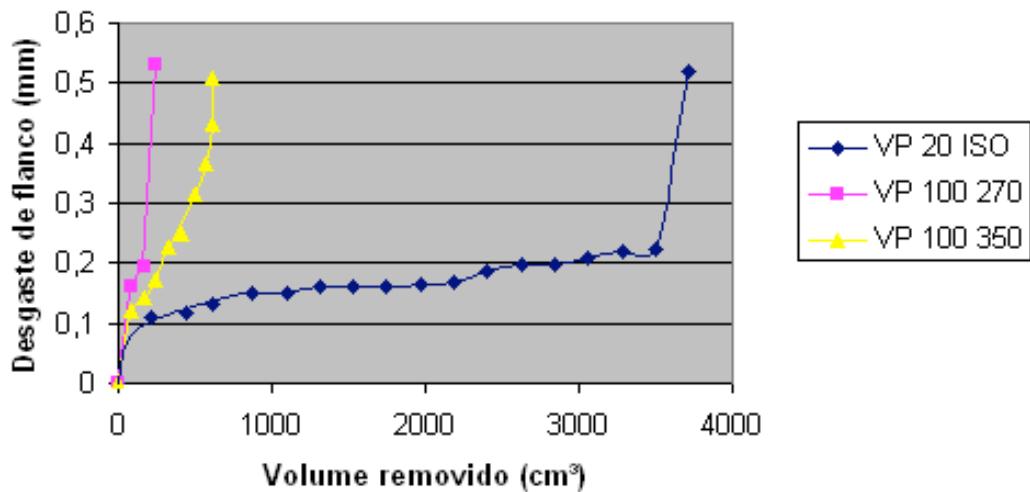


Figura 4.14 - Desgaste de flanco da ferramenta em função do volume de material removido no fresamento para os aços VP20 ISO e VP100 com 270 e 350 ppm de Ti na condição 7 da Tab. 3.4

$V_c = 200 \text{ m/min, } ap = 2 \text{ mm, } fz = 0,1 \text{ mm/dente.}$

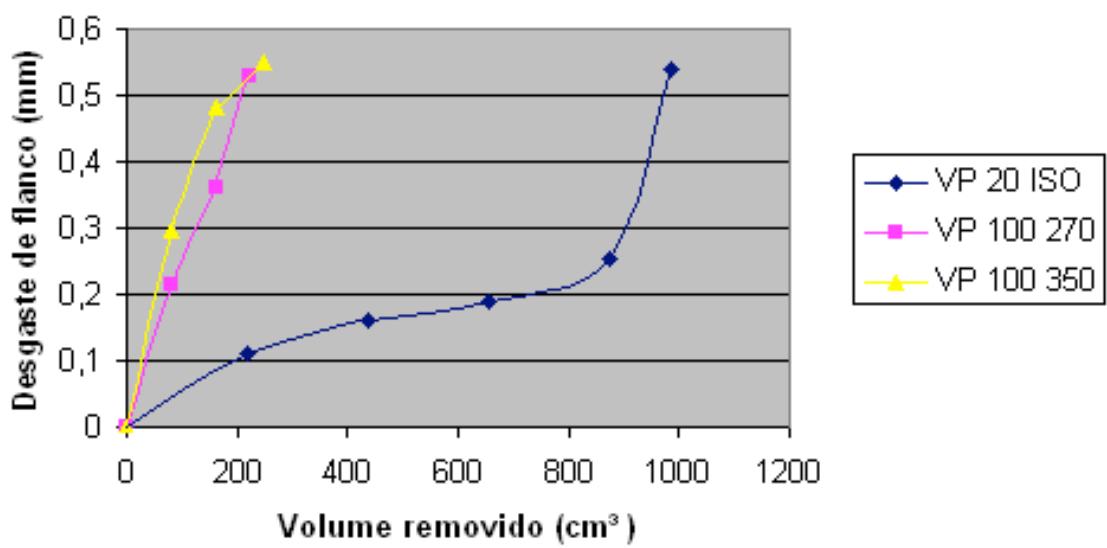


Figura 4.15 - Desgaste de flanco da ferramenta em função do volume de material removido no fresamento para os aços VP20 ISO e VP100 com 270 e 350 ppm de Ti na condição 5 da Tab. 3.4

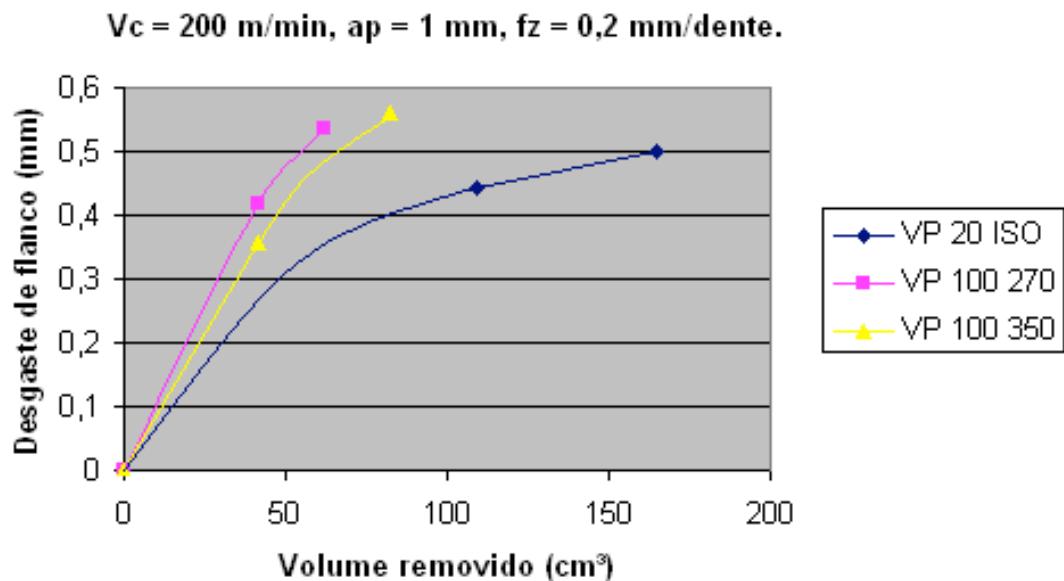


Figura 4.16 - Desgaste de flanco da ferramenta em função do volume de material removido no fresamento para os aços VP20 ISO e VP100 com 270 e 350 ppm de Ti na condição 4 da Tab. 3.4

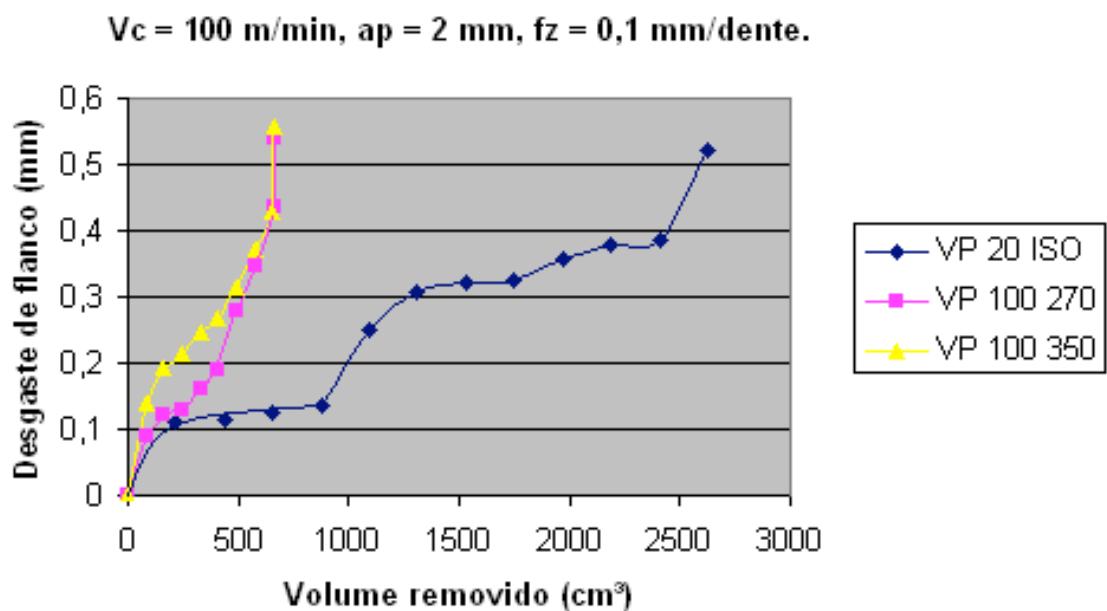


Figura 4.17 - Desgaste de flanco da ferramenta em função do volume de material removido no fresamento para os aços VP20 ISO e VP100 com 270 e 350 ppm de Ti na condição 6 da Tab. 3.4

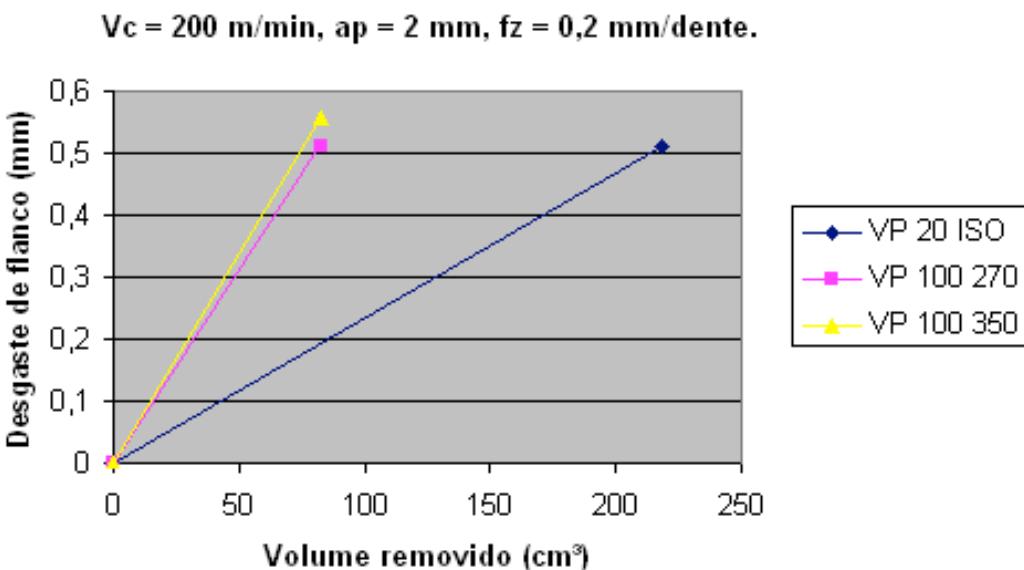


Figura 4.18 - Desgaste de flanco da ferramenta em função do volume de material removido no fresamento para os aços VP20 ISO e VP100 com 270 e 350 ppm de Ti na condição 8 da Tab. 3.4

Nesse caso, o comportamento esperado sugere que o VP100 com 270 ppm de titânio demonstrasse um melhor desempenho do que o aço com maior teor de titânio. O que não foi verificado na maioria dos testes realizados. Sendo assim, se fez necessário uma análise mais criteriosa dos aspectos metalúrgicos relacionados à microestrutura desses aços na busca de uma explicação plausível para tal comportamento.

4.2.1. Resultados relativos às análises metalográficas dos materiais testados

Foram feitas análises e comparações entre fotomicrografias dos aços estudados com o intuito de estabelecer as diferenças microestruturais relativas a alguns aspectos tais como tamanho, quantidade e forma das partículas de carbonitreto de titânio presentes nas mesmas e que possam estar relacionadas ao comportamento apresentado pelos materiais. As Figuras 4.19 a 4.26 apresentam algumas das fotomicrografias dos aços VP100 com 270 e 350 ppm de Ti, reveladas com a utilização do reagente Nital a 2%, onde é possível observar a presença das partículas de carbonitreto de titânio com formato poliédrico.

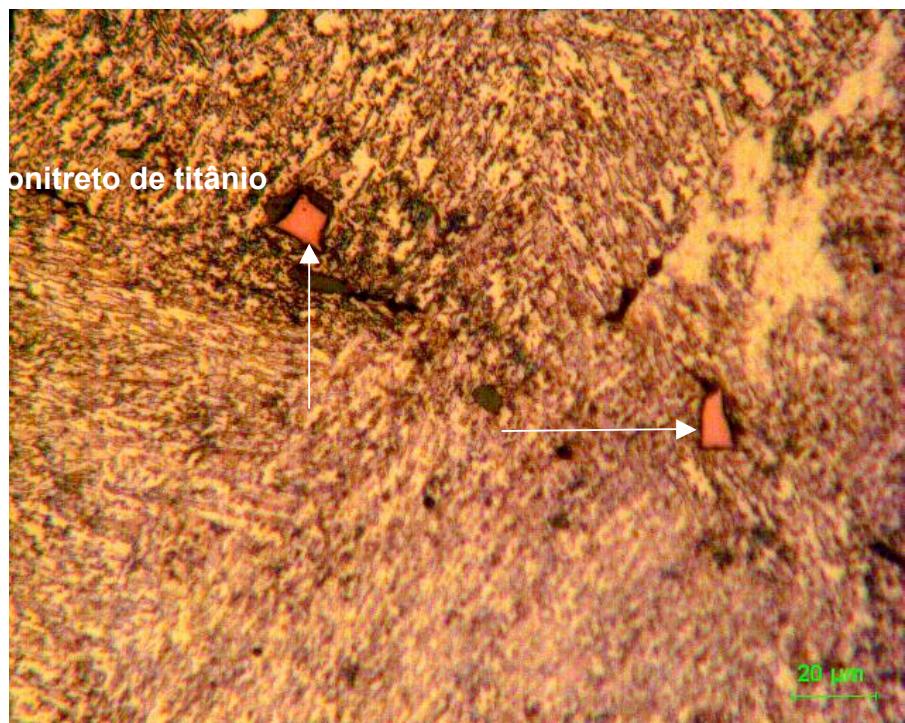


Figura 4.19 - Micrografia indicando a presença de carbonitreto de titânio na microestrutura do aço VP100 com 270 ppm de Ti, contendo 02 partículas visíveis



Figura 4.20 - Micrografia indicando a presença de carbonitreto de titânio na microestrutura do aço VP100 com 270 ppm de Ti e contendo 01 partícula visível



Figura 4.21 - Micrografia indicando a presença de carbonitreto de titânio na microestrutura do aço VP100 com 270 ppm de Ti e contendo 01 partícula visível



Figura 4.22 - Micrografia indicando a presença de carbonitreto de titânio na microestrutura do aço VP100 com 270 ppm de Ti sem a presença partículas visíveis

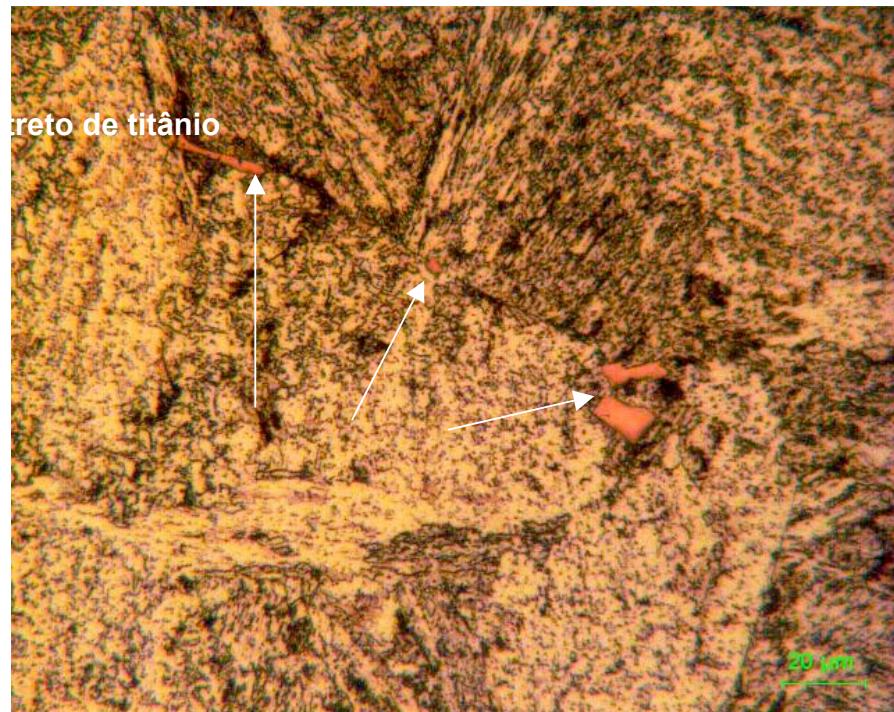


Figura 4.23 - Micrografia indicando a presença de carboniteto de titânio na microestrutura do aço VP100 com 350 ppm de Ti contendo 04 partículas visíveis



Figura 4.24 - Micrografia indicando a presença de carboniteto de titânio na microestrutura do aço VP100 com 350 ppm de Ti contendo 03 partículas visíveis

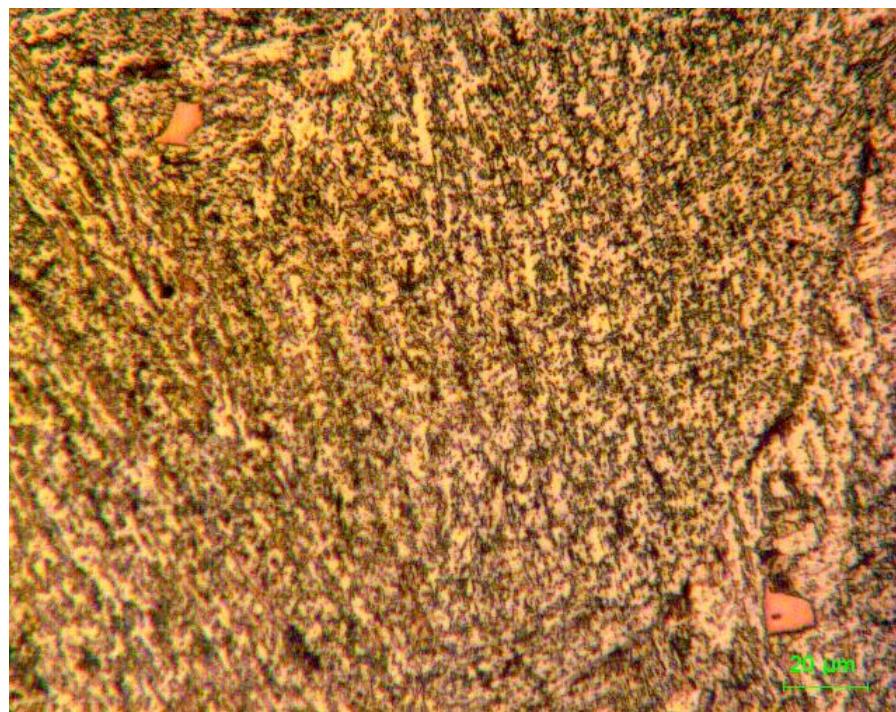


Figura 4.25 - Micrografia indicando a presença de carbonitreto de titânio na microestrutura do aço VP100 com 350 ppm de Ti contendo 02 partículas visíveis

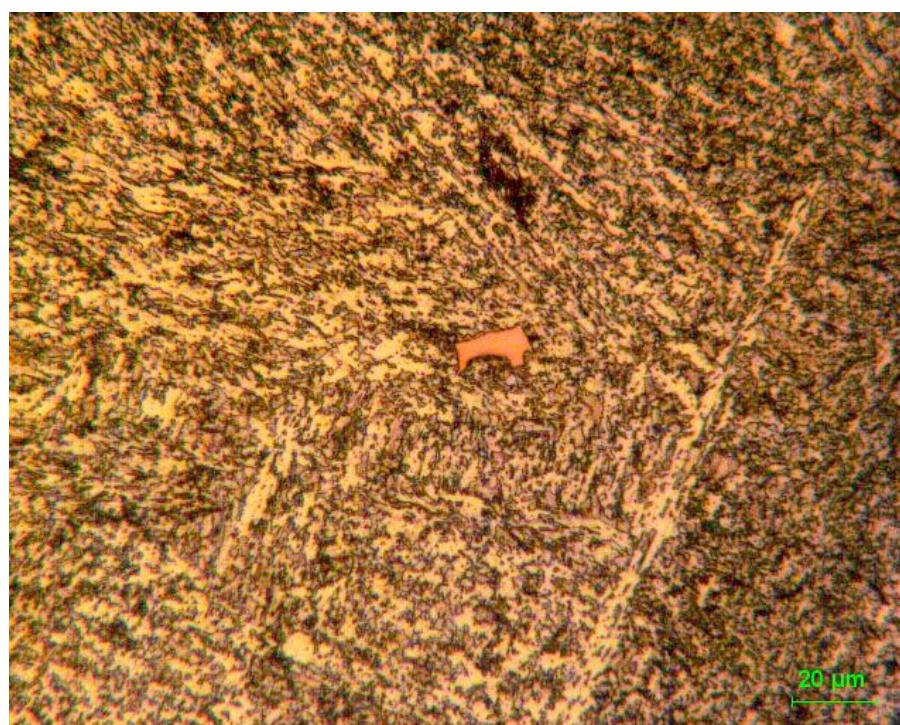


Figura 4.26 - Micrografia indicando a presença de carbonitreto de titânio na microestrutura do aço VP100 com 350 ppm de Ti contendo 01 partícula visível

Foram realizados testes de microdureza nas partículas poliédricas presentes nos aços VP100. A Figura 4.27 apresenta uma micrografia com as indentações do microdurômetro nas partículas de carbonitreto de titânio. Os relatórios emitidos pelo microdurômetro indicaram um valor médio de microdureza em torno de 2.819,43 HV, em acordo com valores relatados pela literatura conforme pode ser visto na Tab. 4.1.

A partir das microestruturas, é possível observar a presença de carbonitretos com tamanhos mais variados e de forma mais dispersa no aço VP100 com 350 ppm de Ti. Inclusive, em alguns casos, localizados nos contornos, possivelmente de fase ou de grão. Um maior percentual de titânio certamente proporcionou esses aspectos na microestrutura desse material. Observa-se também que, nas micrografias apresentadas, o aço VP100 com 350 ppm de Ti apresenta um número de partículas visíveis de carbonitreto de titânio (10 partículas) que é relativamente maior que aquelas do aço VP100 com 270 ppm de Ti (04 partículas), cujas partículas apresentam forma e distribuição mais homogêneas. Essa disposição geométrica das partículas é um fator a ser considerado na usinabilidade desses materiais.

Segundo Barbosa; Bacalhau (2011), corridas do aço VP100 com teores similares de Ti, podem apresentar quantidades distintas de partículas duras. Nesse caso, são as partículas grosseiras que prejudicam a usinabilidade do aço.

Tabela 4.1 Dureza de alguns revestimentos à temperatura ambiente (SHARMAN, 1998).

Revestimento	/	Dureza HV
TiN		1930–2200
CrN		1650–2150
TiCN		2700–3000
TiAlN		3000–3500
TiAlCrYN		2700
TiN/AlN		4000
TiAlCN		3200
AlTiN		2700

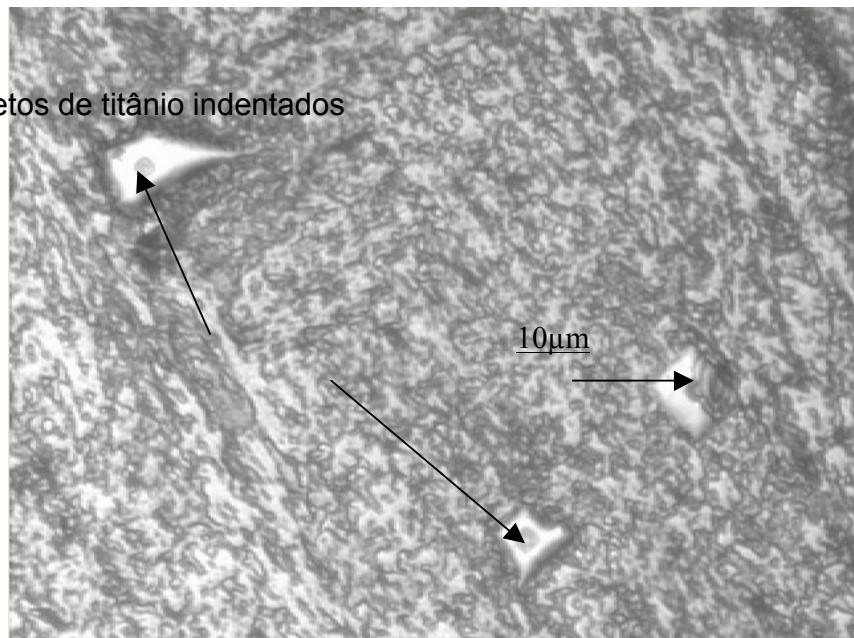


Figura 4.27 - Micrografia revelando as indentações realizadas nos carbonitretos de titânio presentes no aço VP100 com 350 ppm de Ti

Ainda analisando as micrografias do VP100 apresentadas anteriormente, é possível perceber que o material que contém 270 ppm de Ti e que demonstrou pior desempenho em usinagem, possui partículas com tamanhos iguais ou maiores que aquelas observadas no aço com 350 ppm de Ti. Ou seja, o aço VP100 com 270 ppm de Ti apresentou um contingente mais homogêneo de partículas grosseiras do que o VP100 com 350 ppm de Ti. Trata-se de um aspecto que certamente exerceu alguma influência no comportamento observado.

Como citado no capítulo 2, o aço VP100 que é microligado ao titânio e ao vanádio que induzem a formação de uma microestrutura de bainita inferior, cuja dureza é homogênea para resfriamentos rápidos e lentos (MESQUITA; CAPUCCIO; BARBOSA, 2009).

Os aços microligados costumam ser de baixo e médio carbono contendo pequenas quantidades de elementos de liga, tais como vanádio, nióbio e titânio. Estes elementos podem ser adicionados de forma isolada ou combinada. O desenvolvimento desses aços tem como objetivos principais: o refinamento de grão

para aumento de resistência e tenacidade; o endurecimento por precipitação no resfriamento, após a laminação ou em tratamentos térmicos posteriores; e a melhoria da tenacidade e soldabilidade de aços baixo carbono (TITHER, 2001).

A precipitação de carbonetos e carbonitretos dos elementos microligantes na ferrita gera um endurecimento significante no material. A solubilidade dos elementos de liga formadores dos referidos compostos é menor na ferrita do que na austenita, o que leva a uma supersaturação destes compostos, que é a força-motriz para a precipitação. A precipitação destes compostos de dureza elevada são barreiras que agem como obstáculos para o movimento das discordâncias, aumentando a resistência mecânica à deformação do aço. O endurecimento é tanto maior quanto maior a fração volumétrica destes precipitados e quanto menor for o tamanho dos precipitados (HERNÁNDEZ, et al. 1992), fato que justifica uma maior dureza apresentada pelo VP100 com 350 ppm de Ti, considerando ser este o material que apresentou maior quantidade de partículas com tamanhos menores.

Além das diferenças relativas à quantidade e forma dos carbonitretos de titânio presentes no VP100, foram observadas também outras características presentes nas microestruturas desses materiais. A Figura 4.28 apresenta um outro conjunto de micrografias, também reveladas com o reagente Nital a 2%, que possibilitam estabelecer algumas diferenças entre a composição das fases em cada um dos aços VP100 estudados. Nessas micrografias foi observado uma presença diferenciada da fase que aparece em coloração branca e que se apresenta com forma e concentração distintas nos aços VP100 analisados. Nesse caso, o VP100 com 270 ppm de Ti, apresentou uma maior incidência de concentrações da fase de coloração branca, possivelmente constituída pela fase ferrítica e/ou austenita retida. Essa fase branca aparece de forma grosseiramente dispersa em meio à fase predominante que aparece com a coloração cinza escuro, provavelmente constituída pela estrutura bainítica inferior. Já no VP100 com 350 ppm de Ti, tal característica não foi observada na mesma proporção. Essas diferenças quanto à forma, concentração e distribuição da fase branca, certamente exercem uma importante influência no comportamento do material quando em usinagem.

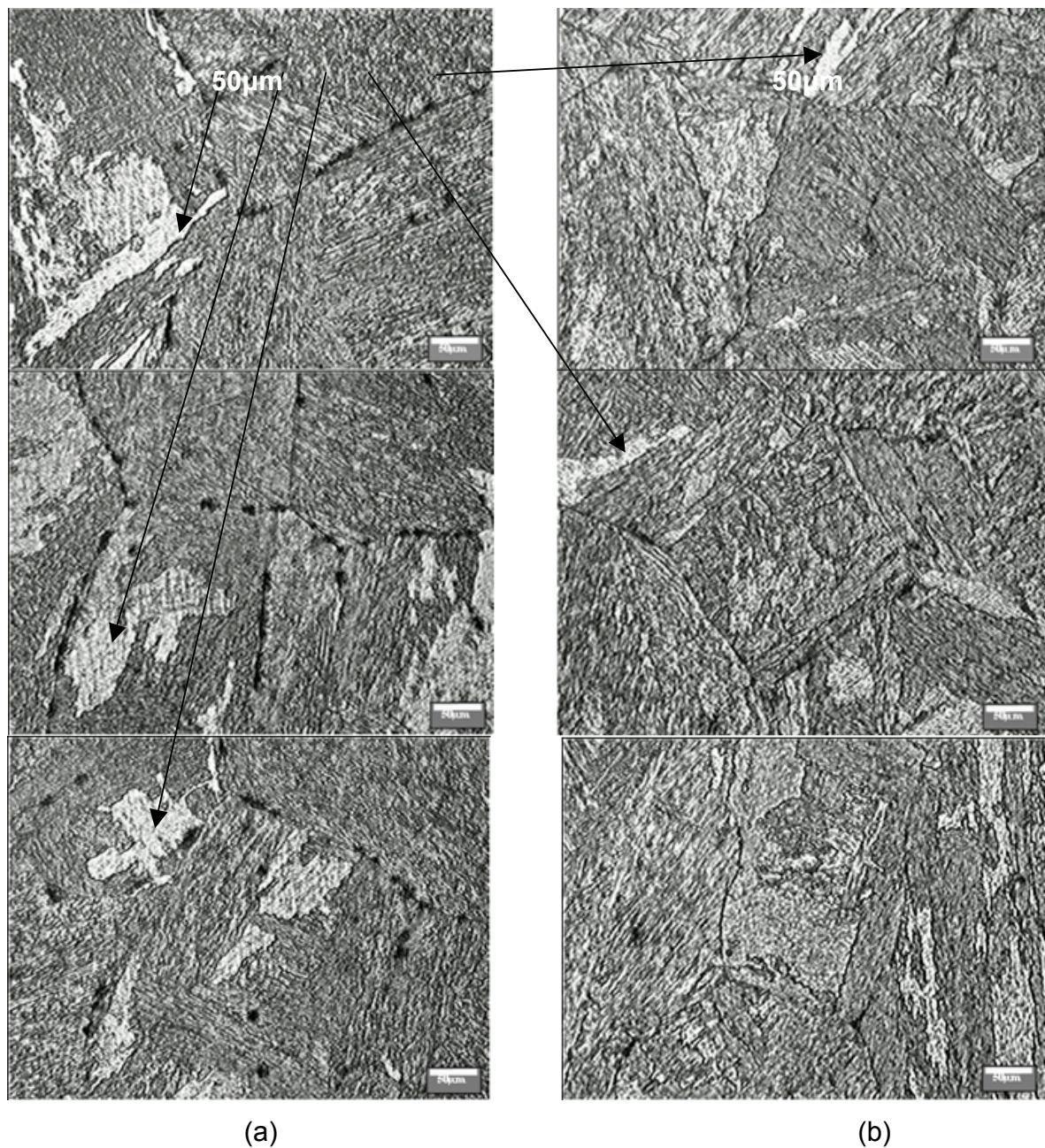


Figura 4.28 - Microestrutura dos aços (a) VP100 com 270 ppm de Ti apresentando a fase branca grosseiramente dispersa na microestrutura (b) VP100 com 350 ppm de Ti apresentando uma distribuição mais homogênea entre as fases

Uma visualização mais detalhada da presença desses microconstituintes nos aços VP100 estudados é apresentada na Fig. 4.29.

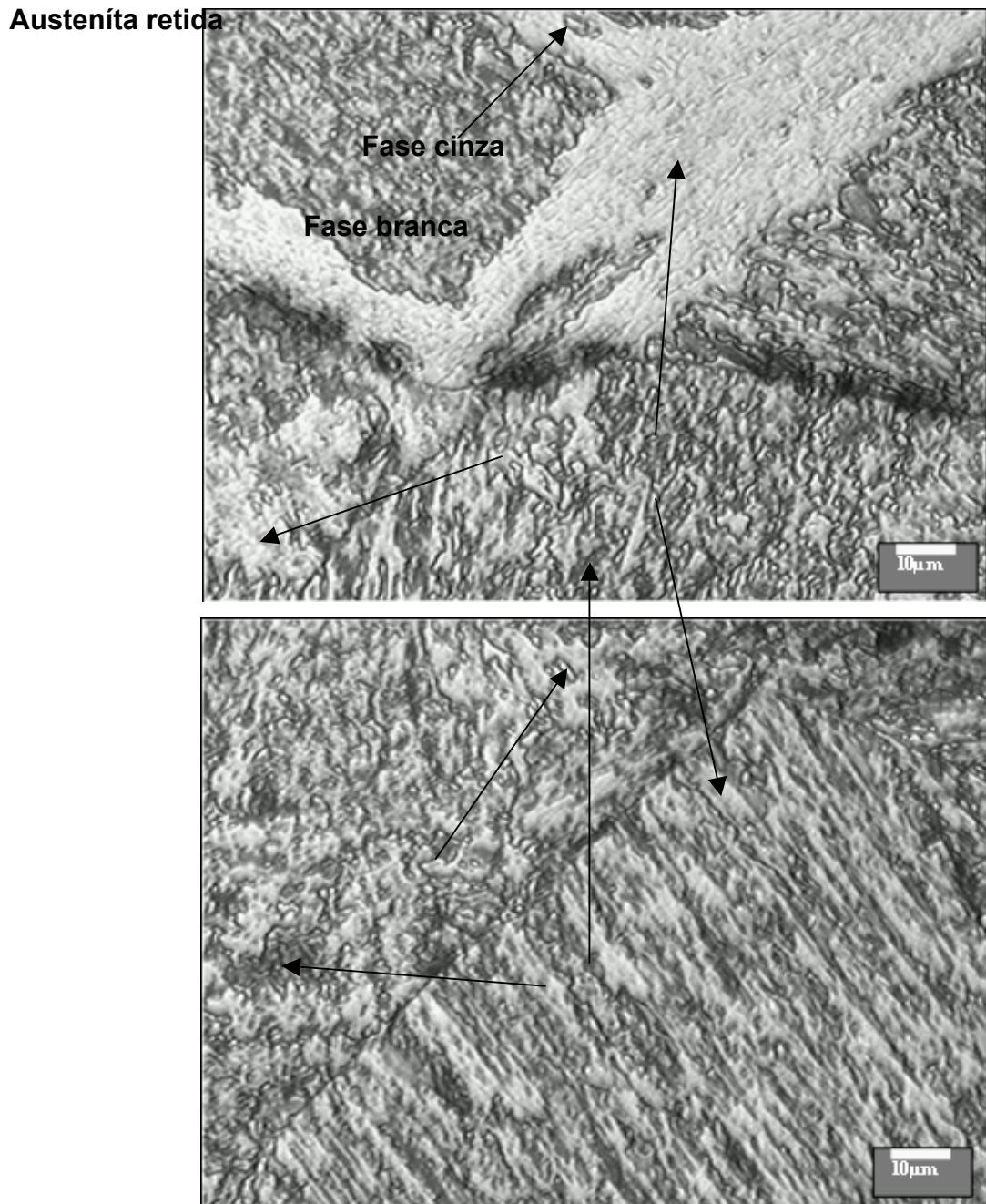
Austenita retida

Figura 4.29 - Micrografias (a) do VP100 com 270 ppm de Ti apresentando uma concentração de fase branca em uma área específica e (b) VP100 com 350 ppm de Ti apresentando a fase branca distribuída de forma mais homogênea na microestrutura

Ensaios de microdureza realizados na fase branca, que se encontra de forma grosseiramente dispersa no VP100 com 270 ppm de Ti, revelaram uma dureza média de 563,062 HV, inferior aos valores obtidos nos ensaios realizados na fase

cinza, cuja dureza média foi de 674,858 HV. A Figura 4.30 apresenta uma micrografia de uma das indentações realizadas nos ensaios de microdureza.

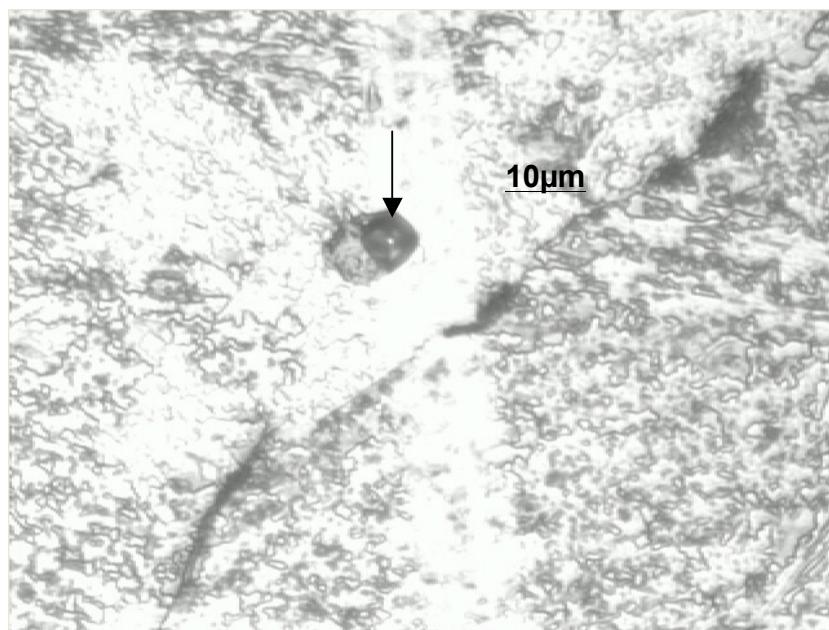


Figura 4.30 - Micrografia do VP100 com 270 ppm de Ti apresentando a indentação da fase branca, realizada nos ensaios de microdureza

Quando um material é usinado, as respostas mecânicas às deformações que ocorrem nas zonas de cisalhamento primário e secundário, são oriundas de fenômenos que ocorrem internamente ao material e que proporcionam o seu endurecimento ou o seu amaciamento, face aos esforços demandados. O endurecimento é causado pelo encruamento ao passo que o amaciamento é consequência da recuperação e recristalização dinâmica, sendo que ambos ocorrem quando o material sofre deformação a altas temperaturas nas zonas de cisalhamento primário e secundário. O comportamento do material sofre influência desses fenômenos que fazem variar a resistência mecânica e a ductilidade, dependendo da predominância de cada um. A resistência do material aumenta e a ductilidade decresce sob a predominância dos fenômenos de endurecimento. Já sob predominância dos fenômenos de amaciamento tem-se um decréscimo da resistência e um consequente aumento da ductilidade. Esses fundamentos se tornam importantes quando se busca uma condição ótima de trabalho dos materiais,

o que possibilitará a concepção de sistemas produtivos mais eficientes (MEDEIROS, 2007).

A composição química e as características do material que dizem respeito ao tamanho e à distribuição das partículas que compõe as fases, associados aos parâmetros metalúrgicos representados pela temperatura, deformação e taxa de deformação, quando combinados com as características do processo de usinagem, dão como resultado variações nas propriedades mecânicas e, consequentemente, do comportamento do material durante o processo de usinagem.

As concentrações de fase branca que aparecem de forma grosseiramente dispersa na microestrutura do VP100 com 270 ppm de Ti podem ter contribuído para intensificar o desgaste da ferramenta durante os testes de usinagem, considerando que tais estruturas possuem propriedades e comportamento metalúrgico sob deformação, diferentes do resto da microestrutura do material. Esse é certamente mais um fator que pode ter contribuido para um pior desempenho deste aço em relação ao VP100 com 350 ppm de Ti, cuja microestrutura revelou ser mais homogênea quanto à distribuição da fase branca na microestrutura como um todo.

Considerando que o VP20 ISO foi o material utilizado como referência para comparações nos teste realizados, é apresentado na Fig. 4.31 uma micrografia do mesmo, onde observa-se que esta apresenta características diferentes das reveladas para as duas modalidades de VP100 analisadas.

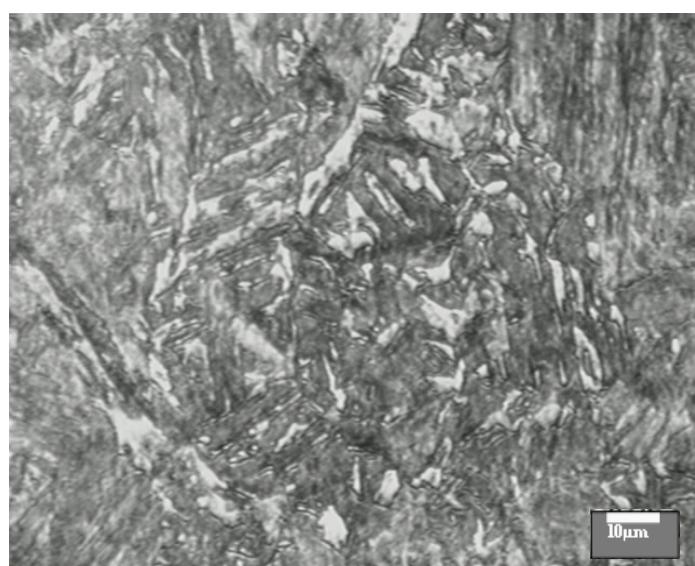


Figura 4.31 - Micrografia do VP20 ISO