

**UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

FABIO ALVES DA SILVA

**PROPOSTA DE NOVOS INDICADORES DE QUALIDADE PARA MANUFATURA
DE MATRIZES DE CONFORMAÇÃO A FRIO**

São Paulo

2013

FABIO ALVES DA SILVA

**PROPOSTA DE NOVOS INDICADORES DE QUALIDADE PARA MANUFATURA
DE MATRIZES DE CONFORMAÇÃO A FRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Prof. Rafael Agnelli Mesquita, Dr. - Orientador

São Paulo

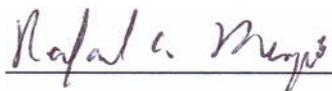
2013

FABIO ALVES DA SILVA

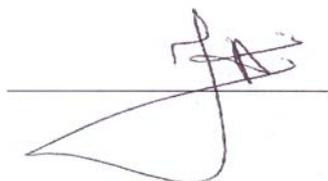
**PROPOSTA DE NOVOS INDICADORES DE QUALIDADE PARA MANUFATURA
DE MATRIZES DE CONFORMAÇÃO A FRIO**

Essa dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção foi julgada adequada e aprovada em sua forma final pela comissão organizadora do Programa de Mestrado em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho composta pelos Professores Doutores que seguem abaixo.

São Paulo - SP, 19 de Fevereiro de 2013.



Prof. Dr. Rafael Agnelli Mesquita - Orientador
Universidade Nove de Julho – SP



Prof. Dr. Felipe Araújo Calarge
Universidade Nove de Julho – SP



Prof. Dr. André Luiz Helleno
Universidade Metodista de Piracicaba - SP

UNINOVE



Universidade Nove de Julho

ATA DE DEFESA DA DISSERTAÇÃO

Aos décimo nono dia do mês de fevereiro de dois mil e treze, às 13h30, na sala 203 do Centro de Pós-Graduação, desta Universidade, reuniu-se em sessão pública a Comissão Julgadora da dissertação de Mestrado de **Fabio Alves da Silva** sob o título "Proposta de Novos Indicadores de Qualidade para Manufatura de Matrizes de Conformação a Frio".

Integraram a comissão os professores: Prof. Dr. Rafael Agnelli Mesquita (UNINOVE), Prof. Dr. André Luiz Helleno (UNIMEP), Prof. Dr. Felipe Araújo Calarge (UNINOVE) e o sob a presidência do primeiro, orientador da dissertação. A banca examinadora, tendo decidido aceitar a dissertação, passou à arguição pública do candidato. Encerrados os trabalhos, os examinadores deram parecer final sobre a dissertação.

Prof. Dr. Rafael Agnelli Mesquita

Prof. Dr. André Luiz Helleno

Prof. Dr. Felipe Araújo Calarge

Parecer

APROVADO

APROVADO

APROVADO

Parecer:

Em conclusão, o candidato foi considerado APROVADO, no grau de Mestre em Engenharia de Produção. E, para constar, eu, Prof. Dr. André Felipe Henriques Librantz, diretor do Programa de Mestrado em Engenharia de Produção, lavrei a presente ata que assino juntamente com os membros da banca examinadora.

São Paulo, 19 de fevereiro de 2013.

Prof. Dr. Rafael Agnelli Mesquita

Prof. Dr. Felipe Araújo Calarge

Prof. Dr. André Luiz Helleno

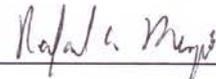
Prof. Dr. André Felipe Henriques Librantz

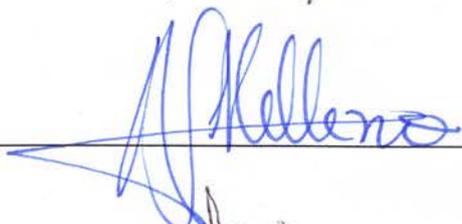
São Paulo, 19 de fevereiro de 2013.

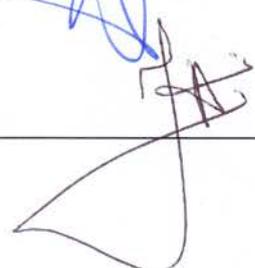
TERMO DE APROVAÇÃO

Aluno: FABIO ALVES DA SILVA

Título da Dissertação: Proposta de Novos Indicadores de Qualidade para Manufatura de Matrizes de Conformação a Frio.

Presidente: PROF. DR. RAFAEL AGNELLI MESQUITA  _____

Membro: PROF. DR. ANDRÉ LUIZ HELLENO  _____

Membro: PROF. DR. FELIPE ARAÚJO CALARGE  _____

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Luiz e Leonides, à minha esposa Simone e ao meu filho Pedro, pelo apoio, companheirismo, amor e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Minha gratidão ao meu orientador, o Professor Dr. Rafael Agnelli Mesquita pelo incentivo, dedicação e presteza nas orientações, me conduzindo sempre a maiores reflexões e contribuindo com inúmeras sugestões que enriqueceram o meu conhecimento e o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores que participaram desta pequena jornada, contribuindo de forma significativa, direta ou indiretamente no desenvolvimento deste trabalho, em especial ao Prof. Dr. Thiago Michel de Brito Farias que foi também um colaborador na execução de parte deste trabalho (análises de impedância elétrica), por sua cordialidade e presteza.

Aos colegas de classe pelos momentos de convívio, trocas de informações e experiências pessoais e profissionais.

A Deus, por iluminar meus caminhos e me dar forças para seguir sempre em frente e, finalmente, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que este projeto fosse concluído.

RESUMO

Visando contribuir para os aspectos de qualidade, produtividade e custo em usinagem, sugerindo indicadores que possam abranger essas disciplinas neste processo produtivo, para conseqüentemente ser utilizados pelas indústrias de matrizes para conformação a frio em seus processos de usinagem, o presente trabalho está focado em avaliar carbonetos eutéticos tipo M_7C_3 em aço D6 (nome comercial VC131), a partir da técnica de metalografia quantitativa e técnica de análise de impedância elétrica. Os resultados dos carbonetos analisados foram comparados às propriedades do material em relação ao seu comportamento em usinagem, e por consequência da análise dos resultados obtidos, foi possível elaborar indicadores de qualidade, produtividade e custo, conforme supracitado. Os principais resultados obtidos por meio da realização deste estudo foram: i) que os carbonetos são mais grosseiros no núcleo, prejudicando a usinabilidade; ii) que os carbonetos podem ser também correlacionados à resistência elétrica do material, gerando uma técnica não destrutiva de avaliação do indicador de qualidade para a usinabilidade.

Palavras-chave: Carbonetos, Aços para Trabalho a Frio, Metalografia, VC131.

ABSTRACT

Seeking to contribute for the quality aspects, productivity and cost in machining, suggesting indicators to include those disciplines in this productive process, and consequently they be used by the industries of head offices for resignation to cold in their machining processes, the present work, therefore, it is focused in evaluating carbides eutectics type M_7C_3 in steel D6 steel (commercial name VC131), starting from the technique of quantitative metallography and technique of analysis of electric impedance. The results of the carbides analyzed in the steel of the present work will be compared to properties of the material in relation to its behavior in machining, and for consequence of the analysis of the obtained results, it was possible to elaborate quality indicators, productivity and cost, as mentioned. The main results obtained by this study were: i) that the carbides are coarser in the nucleus, impairing the machinability ii) that the carbides can also be correlated to the electrical resistance of the material, generating a non-destructive technique for evaluating the indicate quality for machinability.

Key words: Carbides, Cold work tool steels, Metallography, AISI D6.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Exemplo de alguns indicadores de desempenho para medir o desempenho da empresa em relação ao objetivo principal... ..	23
Figura 2.2: Terminologias utilizadas para caracterizar indicadores de desempenho organizacional... ..	24
Figura 2.3: Dimensões nas quais as empresas analisadas medem seu desempenho.....	30
Figura 2.4: Fatores mais restritivos à adoção/utilização das novas práticas de medição do desempenho nas empresas avaliadas.....	31
Figura 2.5: Metodologias de desempenho utilizadas pelas empresas avaliadas.....	31
Figura 2.6: Análise do tempo de usinagem nos últimos 15 anos... ..	33
Figura 2.7: Comparação da dureza dos carbonetos de liga presentes nos aços ferramenta versus a dureza da matriz microestrutural destes aços... ..	39
Figura 2.8: Microestrutura dos aços para trabalho a frio a) VC131, b) VF800AT e c) VND.....	40
Figura 2.9: Variação da microestrutura da superfície para o núcleo de aços com alta concentração de carbonetos. Material: aço D6... ..	40
Figura 2.10: Micrografia de liga de alumínio com diferentes frações volumétricas de (Al/Si _p + SiC _p)	41
Figura 2.11: Resistência média à flexão e dureza Vickers de Al/Si _p + SiC _p e Desgaste versus fração de volume de Al/Si _p + SiC _p	42
Figura 2.12: Efeito da velocidade de corte sobre o desgaste da ferramenta... ..	43
Figura 2.13: Tempo de corte versus desgaste de flanco em diferentes MMCs.....	44
Figura 2.14: Efeito da temperatura de homogeneização no volume de carbonetos.....	46
Figura 2.15: Desgaste de flanco de ferramentas de metal duro revestidos após a remoção de metais.....	47
Figura 2.16: Desgaste de flanco versus o volume de metal removido com carboneto revestido e ferramentas de cerâmica... ..	47
Figura 3.1: Fluxograma sintético do desenvolvimento deste trabalho.....	49
Figura 3.2: Desenho esquemático da obtenção das amostras e das regiões de estudo deste trabalho.....	51

Figura 4.1: Princípio das determinações realizadas pelo software de quantificação	58
Figura 4.2: Quantificação do volume médio dos aglomerados de carbonetos em diferentes regiões do aço VC131(seção retangular)..	61
Figura 4.3: Quantificação do volume médio dos aglomerados de carbonetos em diferentes regiões do aço VC131(seção circular).....	62
Figura 4.4: Quantificação do tamanho médio das partículas de carbonetos do aço ferramenta para trabalho a frio VC131 (seção retangular) nas diferentes regiões do material: superfície, meio raio e núcleo. Seção longitudinal do material	63
Figura 4.5: Quantificação do tamanho médio das partículas de carbonetos do aço ferramenta para trabalho a frio VC131 (seção retangular) nas diferentes regiões do material: superfície, meio raio e núcleo. Seção transversal do material.....	64
Figura 4.6: Análise óptica da variação de aglomerados de carbonetos nas diferentes regiões do aço VC131.....	65
Figura 4.7: Desenho esquemático da metodologia utilizada para quantificação do volume de aglomerado de carbonetos no aço VC131.....	66
Figura 4.8: Resultados da análise da impedância elétrica no aço VC131 (seção retangular) nas regiões da superfície, meio raio e núcleo do material..	67
Figura 4.9: Resultados da análise da impedância elétrica no aço VC131 (seção circular) nas regiões da superfície, meio raio e núcleo do material.....	68
Figura 4.10: Correlação entre a distribuição do volume de aglomerados de carbonetos versus a impedância elétrica em diferentes regiões do aço VC131 (seção retangularl).....	69
Figura 4.11: Correlação entre a distribuição do volume de aglomerados de carbonetos versus a impedância elétrica em diferentes regiões do aço VC131 (seção circular)).....	69
Figura 4.12: Resultado dos ensaios de usinagem no aço VC131 (seção retangular) por meio de fresamento, correlacionando o desgaste ao material nas regiões da superfície, meio raio e núcleo do material <i>versus</i> o tempo de usinagem.....	71
Figura 4.13: Análise do desgaste da ferramenta na usinagem do VC131 (seção retangular)..	72
Figura 4.14: Correlação entre a distribuição do volume de aglomerados de carbonetos versus o tempo de vida da ferramenta em diferentes regiões do aço VC131 (seção retangular)..	73

Figura 4.15: Correlação entre a impedância elétrica versus o tempo de vida da ferramenta em diferentes regiões do aço VC131 (seção retangular).....	74
Figura 4.16: Correlação entre a distribuição do volume de aglomerados de carbonetos no aço VC131 (seção retangular) versus o custo da ferramenta de usinagem.....	76
Figura 4.17: Correlação entre a impedância elétrica no aço VC131 (seção retangular) versus o custo da ferramenta de usinagem..	77
Figura 4.18: Seção vertical do digrama pseudo-binário Fe-C-Cr, para teor fixo de 13% de Cr..	78
Figura 4.19: Taxa de resfriamento para três lingotes em função da distância da parede do molde..	79
Figura 4.20: Fluxo sintético da análise do atendimento aos objetivos propostos para este trabalho.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Classificação AISI dos aços ferramenta.....	36
Tabela 2.2: Classificação ABNT NBR 6189 dos aços ferramenta.....	36
Tabela 3.1: Composição química do ao VC131.....	50
Tabela 3.2: Parâmetros dos ensaios de usinagem no aço VC131.....	55
Tabela 4.1: Resumo do levantamento estatístico do volume médio dos aglomerados de carbonetos do aço ferramenta para trabalho a frio VC131 (seção retangular) nas diferentes regiões do material: superfície, meio raio e núcleo.....	60
Tabela 4.2: Resumo do levantamento estatístico do volume médio dos aglomerados de carbonetos do aço ferramenta para trabalho a frio VC131 (seção circular) nas diferentes regiões do material: superfície, meio raio e núcleo.....	61
Tabela 4.3: Resumo do levantamento estatístico do tamanho médio das partículas de carbonetos do aço ferramenta para trabalho a frio VC131 (seção retangular) nas diferentes regiões do material: superfície, meio raio e núcleo. Seção longitudinal do material.....	62
Tabela 4.4: Resumo do levantamento estatístico do tamanho médio das partículas de carbonetos do aço ferramenta para trabalho a frio VC131 (seção retangular) nas diferentes regiões do material: superfície, meio raio e núcleo. Seção transversal do material.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

- ABNT** - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AISI** - *American Iron and Steel Institute*
- Al** - Alumínio
- Ap** - Profundidade de corte
- ASTM** - *American Society for Testing and Materials*
- BS OHSAS** - *British Standard for occupational health and safety management systems*
- BSC** - *Balanced Scorecard*
- C** - Carbono
- Cr** - Cromo
- HRC** - Dureza Rockwell
- HSM** - *High-Speed Machining*
- HV** - Dureza Vickers
- ISO** - International Organization for Standardization
- Lf** - Largura do corpo de prova usinado
- M₇C₃** . Carboneto rico em cromo com estrutura hexagonal que possui alta solubilidade de ferro manganês, mas baixa solubilidade de molibdênio e vanádio
- MC** - Carboneto com estrutura cúbica tipo NaCl, só encontrado nos aços Cr-Mo quando há adição de vanádio, nióbio e titânio, com baixa solubilidade do ferro.
- MMC** - Compósitos com matriz de metal
- Mo** - Molibdênio
- NBR** - Norma Brasileira
- r** - raio menor
- R** - Raio maior
- SAE** - *Society of Automotive Engineers*
- Si** - Silício
- SiC_p** . Carboneto de silício
- SINAES** - Sistema Nacional de Avaliação da Educação Superior
- TI** - Tecnologia da Informação
- UNESCO** - *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*
- V** - Vanádio
- W** - Tungstênio

WCM - *Word Class Manufacturing*

μm^2 - micrón metro quadrado

$^{\circ}\text{C}/\text{min}$ - grau Celsius por minuto

Ω - ohm

mm - milímetro

mm^3 - milímetro cúbico

kHZ - kilohertz

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Objetivos.....	20
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	21
2.1 Indicadores de desempenho e qualidade.....	21
2.1.1 Indicadores segundo as principais normas de sistema de gestão da qualidade, meio ambiente, segurança e saúde no trabalho.....	21
2.1.2 Tipos de indicadores da qualidade e desempenho, com ênfase no <i>Balanced Scorecard</i>	22
2.1.3 Medição e aplicação dos indicadores de qualidade e desempenho pelas empresas.....	27
2.2 Aspectos de custo e a usinagem na indústria de moldes e matrizes.....	32
2.3 Aços para moldes e matrizes.....	34
2.3.1 Introdução sobre aços ferramenta.....	34
2.3.2 Classificação dos aços ferramenta.....	35
2.3.3 Aços da série D em ferramentas de trabalho a frio.....	37
2.3.4 Carbonetos nos aços para trabalho a frio.....	38
2.4 Partículas duras e o efeito na usinagem.....	40
2.4.1 Partículas duras em ligas de alumínio.....	41
2.4.2 Partículas duras em ligas de níquel.....	44
2.4.3 Partículas duras em aços ferramenta para trabalho a frio.....	45
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1 Aço ferramenta estudado.....	50
3.2 Experimentos metalográficos.....	52
3.3 Experimentos de análise de impedância elétrica.....	54
3.4 Ensaio de usinagem.....	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
4.1 Avaliação/resultados da metalografia quantitativa (indicador de qualidade do material em usinagem (método destrutivo).....	57
4.2 Avaliação/resultados das análises de impedância elétrica (indicador de qualidade do material em usinagem – método não destrutivo).....	66

4.3 Avaliação/resultados dos ensaios de usinagem (indicador de produtividade em usinagem – desgaste das ferramentas de corte.....	70
4.4 Avaliação dos resultados dos indicadores de qualidade e produtividade versus os efeitos no custo em usinagem (indicadores de custo em usinagem.....	75
4.5 Discussões finais.....	78
5 CONCLUSÃO.....	82
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

1 INTRODUÇÃO

Praticamente todas as etapas de fabricação utilizam algum tipo de ferramenta no processo de manufatura, sendo a produção de ferramentas, moldes e matrizes um importante ramo industrial do país. A competitividade da indústria de moldes e matrizes está muito relacionada aos custos de produção, que por sua vez dependem em grande extensão dos custos de usinagem (KRAJNIK & KOPAC, 2004). O presente estudo está especificamente voltado às ferramentas de corte e conformação a frio, empregadas na indústria metal-mecânica, em processos como: matrizes para corte e conformação de chapas, punções e matrizes para cunhagem e ferramentas para forjamento a frio (MESQUITA & BARBOSA, 2005).

Nas condições de trabalho, as ferramentas de corte e conformação a frio são submetidas a elevados esforços mecânicos, sendo especialmente importante para os materiais que compõem as ferramentas as propriedades de resistência à deformação plástica e a resistência ao desgaste, conforme explicado por Roberts et al., 1998. Segundo o mesmo autor, os aços utilizados para produção de ferramentas possuem elevados teores de carbono e elementos de liga, a fim de proporcionar estas propriedades. Dentre as diversas composições de aços ferramentas, os aços série ASTM D (do inglês, aços para matrizes ou *Die-steels*) são os mais utilizados para a aplicação supracitada, pois estes aços possuem alta resistência ao desgaste (ROBERTS et al., 1998).

A propriedade de resistência ao desgaste dos aços da série D depende fundamentalmente da qualidade do aço ferramenta empregado, que por sua vez está relacionada aos carbonetos dispersos em sua microestrutura. Como mostrado por Mesquita e Barbosa (2008), a dispersão desses carbonetos em um material de alta dureza, por exemplo 60 HRC, promove a melhor combinação para evitar o desgaste e, assim, melhorar o desempenho das ferramentas. Tais carbonetos são partículas de natureza cerâmica, com dureza muito superior à da matriz microestrutural, obtida por têmpera e revenimento. Por exemplo, a matriz microestrutural atinge cerca 700 HV, enquanto os carbonetos tipo M_7C_3 apresentam dureza da ordem de 1600 HV. (WILSON, 1975).

Apesar de conferirem alta resistência ao desgaste aos aços da série D, os carbonetos também podem afetar negativamente outras propriedades,

especialmente a tenacidade e retificabilidade, como mostrado em diversos estudos da literatura, como o estudo de Kasa e Dulis, 1978. Desta forma, desgastes ocorridos por micro trincas (Mesquita, 2004) ou demais mecanismos adesivos (Bressan et. al., 2008) podem ser afetados pelo tamanho e distribuição dos carbonetos, devido ao efeito dos carbonetos na tenacidade. Esta distribuição, por sua vez, depende do processamento do material, como mostrado detalhadamente por Delgado (2010).

Por serem partículas duras, os carbonetos também podem afetar a usinabilidade dos aços ferramenta e, assim, influenciar não apenas o desempenho mas os custos de manufatura da matriz de conformação a frio produzida com o aço ferramenta. Quanto a este aspecto (correlação da usinabilidade e microestrutura dos aços ferramenta), não foram encontradas referências específicas na literatura para os aços da série D, especialmente em relação a dados quantitativos e estatísticos da microestrutura dos materiais. Porém, dados de aços e outras ligas metálicas contendo partículas duras em sua microestrutura mostram forte dependência entre a usinabilidade e a distribuição dessas partículas, como observado em níquel contendo carbonetos duros tipo NbC (Ezugwu et. al., 1999), no comparativo de aços ferramenta convencionais aos obtidos por metalurgia do pó (Kasa & Dulis, 1978), em ligas de Al contendo diferentes quantidades de fases duras ricas em Si (Zangh, et al., 2004) e nos materiais contendo inclusões óxidas de alta dureza (Ozben, 2008). Em todos esses exemplos, partículas duras em maior quantidade ou maior tamanho aumentam significativamente o desgaste abrasivo das ferramentas de usinagem e, portanto, reduzem a usinabilidade do material.

O presente trabalho, portanto, está focado em avaliar os carbonetos no aço para trabalho a frio VC131 (nomenclatura Villares Metals) ou ASTM D6, por ser o aço ferramenta mais utilizado na indústria de matrizes para conformação a frio e por ser o aço ferramenta que possui o maior volume de carbonetos (partículas dura), relacionando-os à usinabilidade do material e sugerindo indicadores de qualidade. Duas técnicas são propostas para a quantificação dos carbonetos: a avaliação destrutiva por metalografia quantitativa e o ensaio não destrutivo de impedância elétrica (método destrutivo e não destrutivo respectivamente), sendo analisadas em diferentes regiões do material, com distintas distribuições de carbonetos. Portanto, os indicadores de qualidade estabelecidos para este material podem ser

relacionados ao desgaste das ferramentas e, conseqüentemente, à usinabilidade e ao custo de manufatura das matrizes de conformação a frio.

1.1 Objetivos

Objetivos gerais

Avaliar a relação entre carbonetos e a usinabilidade dos aços ferramenta da série D, de modo a entender os aspectos que afetam o custo e a produtividade em usinagem das matrizes de conformação produzidas com estes aços. Portanto, são sugeridos indicadores de qualidade e custo que possam ser utilizados pelas indústrias de matrizes para conformação a frio em seus processos de usinagem.

Objetivos específicos

- Definir indicadores de qualidade apropriados à avaliação de aços ferramenta e seus efeitos na usinabilidade dos materiais. Nesta definição de indicadores, foi identificado que um fator importante é a influência de carbonetos na microestrutura dos materiais, analisada pela técnica de metalografia quantitativa e pela técnica de impedância elétrica.
- Após a quantificação, objetivou-se correlacionar os resultados à usinabilidade (fresamento de topo) dos materiais, fornecendo subsídios para previsão de desempenho das ferramentas de corte na usinagem do aço ferramenta para trabalho a frio VC131 (nomenclatura Villares Metals) ou ASTM D6, afetando conseqüentemente nos custos dos processos de usinagem da indústria.
- Visou-se também elaborar resultados para o uso na indústria, que hoje não se atenta para as diferenças de microestrutura e seu efeito na usinagem de aços ferramenta.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Indicadores de desempenho e qualidade

2.1.1 Indicadores segundo as principais normas de sistema de gestão da qualidade, meio ambiente, segurança e saúde no trabalho.

Conforme a NBR ISO 9001, norma que especifica requisitos para um sistema de gestão da qualidade, a organização que deseja implementar um sistema de gestão da qualidade eficaz deve seguir os seguintes requisitos gerais:

- Identificar os processos necessários para o sistema de gestão da qualidade e sua aplicação por toda a organização;
- Determinar a seqüência e interação entre esses processos;
- Determinar critérios e métodos necessários para assegurar que a operação e o controle desses processos sejam eficazes;
- Assegurar a disponibilidade de recursos e informações necessárias para apoiar a operação e o monitoramento desses processos;
- Monitorar, medir e analisar esses processos, e
- Implementar ações necessárias para atingir os resultados planejados e a melhoria contínua desses processos (ABNT, 2008. p. 2).

É possível identificar que os dois últimos requisitos se remetem à necessidade da empresa estruturar, acompanhar e medir os seus processos, bem como os produtos e serviços gerados por meio destes para atingir os objetivos iniciais propostos, voltada à satisfação dos clientes que adquirem estes produtos e serviços e até mesmo os clientes internos da empresa. Há diversas formas para que isso seja possível, uma delas é o estabelecimento dos chamados indicadores de desempenho ou qualidade, como é mais facilmente e comumente conhecido pelo mercado, conforme citado por Zanco et al. (2011).

Ainda conforme especificado pela NBR ISO 9001 (ABNT, 2008), há um requisito específico e mandatório, no qual a empresa que deseja se certificar nesta deve estabelecer, que são os objetivos da qualidade, requisito 5.4.1 desta norma,

mais conhecidos pelas empresas, de indicadores de desempenho ou qualidade, ou por simplificação, indicadores de qualidade.

Outras normas de sistemas de gestão também especificam este mesmo requisito em sua estrutura, somente com uma diferença na sua denominação, Objetivos, Metas e Programas, como é o caso das normas NBR ISO 14001 (2004), que especifica requisitos para um sistema de gestão ambiental, BS OHSAS 18001 (2007) e NBR ISO 18001 (2010), que especificam requisitos para um sistema de gestão da segurança e saúde no trabalho, que são, depois da ISO 9001, as normas mais aplicadas e conhecidas no mercado empresarial. Portanto, é possível concluir que tal assunto é realmente importante para que as empresas atinjam seus objetivos.

2.1.2 Tipos de indicadores da qualidade e desempenho, com ênfase no *Balanced Scorecard*

Segundo Martins e Neto (1998), as empresas que possuem um sistema de gestão da qualidade que abrange todos os seus processos não necessariamente possuem indicadores de desempenho que retratem efetivamente os objetivos principais da empresa, mas sim objetivos pontuais relativos à implementação do sistema de gestão da qualidade. Desta maneira, não se têm a garantia que a empresa esteja medindo efetivamente o seu desempenho, resultado este que é o objetivo principal de se estabelecer os indicadores de desempenho.

Ainda segundo os autores, como maneira de minimizar este efeito, é importante a empresa possuir uma sistematização para gerenciamento deste assunto, sendo o *Balanced Scorecard* uma das ferramentas que pode ser utilizada para tal fim, porém conforme os autores, esta ferramenta pode ser um referencial, mas sua estrutura não abrange por completo todo o contexto empresarial. Logo, há necessidade de implementações, como por exemplo, a inclusão das perspectivas à luz da ótica dos empregados, acionistas e sociedade.

Na Figura 2.1 o autor exemplifica alguns indicadores que podem ser considerados para medição do desempenho da empresa em relação ao objetivo principal (MARTINS & NETO, 1998).

<i>Stakeholders</i>	<i>Meios</i>	<i>Indicadores de Desempenho</i>
Clientes	<ul style="list-style-type: none"> - preço - qualidade - variedade de produtos - rapidez de entrega - confiabilidade no prazo de entrega - inovação dos produtos 	<ul style="list-style-type: none"> - preço de venda do varejo em relação à média da concorrência e custo do produto - nível de satisfação dos clientes; nº de chamadas de campo; nº de reclamações e nº de devoluções - tempo de atendimento de um pedido e tempo de ciclo de manufatura - nº pedidos entregues no prazo e atraso médio da entrega em dias - participação de novos produtos no faturamento e nº de lançamentos de novos produtos no ano
Empregados	<ul style="list-style-type: none"> - moral - higiene e segurança do trabalho - salários - crescimento pessoal e profissional 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>turnover</i>; nº de sugestões aplicadas em relação às sugestões propostas e absenteísmo - nº de acidentes e horas-homem perdidas por acidentes de trabalho - salário médio em relação ao mercado - horas gastas com treinamento e nº de pessoas treinadas no mesmo período
Acionistas	<ul style="list-style-type: none"> - dividendos - valorização do valor do patrimônio 	<ul style="list-style-type: none"> - lucro - valorização da ação no período
Fornecedores	<ul style="list-style-type: none"> - parceria - volume de transações - preço de compra 	<ul style="list-style-type: none"> - nº de pedidos recebidos; nº de itens fornecidos num período de tempo e nº de devoluções - porcentagem de participação do fornecedor no total gasto e valor das transações num período - preço médio do item em relação ao preço médio da concorrência
Sociedade	<ul style="list-style-type: none"> - preservação do meio ambiente - recolhimento de impostos 	<ul style="list-style-type: none"> - nº de ocorrências ambientais e valor das multas recebidas - atraso no recolhimento de impostos

Figura 2.1 Exemplo de alguns indicadores de desempenho para medir o desempenho da empresa em relação ao objetivo principal (MARTINS; NETO, 1998).

Em um estudo realizado por Nascimento et al. (2011), foi demonstrado que há diferentes denominações para o tema de indicadores de qualidade na literatura. Neste estudo, os autores restringiram-se a estudar diversos artigos relacionados às áreas de administração, ciências contábeis e turismo e chegaram as terminologias indicadas na Figura 2.2. Por meio deste estudo os autores chegaram a conclusão que a denominação indicadores de desempenho é a mais utilizada no meio empresarial.

Terminologias Utilizadas	Número de Ocorrências	Percentual (%)
Indicadores de Desempenho	35	41,17
Medidas de Desempenho	10	11,89
Indicadores de Desempenho e Medidas de Desempenho	8	9,41
Indicadores de Desempenho e Indicadores de Resultados	5	5,88
Indicadores de <i>Performance</i>	4	4,70
Critérios	2	2,35
Indicadores Contábeis e Indicadores Financeiros	2	2,35
Indicadores de Qualidade	2	2,35
Indicadores Financeiros	2	2,35
Indicadores Assistenciais	1	1,17
Indicadores Contábeis	1	1,17
Indicadores de Avaliação	1	1,17
Indicadores de Desempenho e Descritor de Impacto	1	1,17
Indicadores de Desempenho e Indicadores Técnicos	1	1,17
Indicadores de Desempenho e Índices de Desempenho	1	1,17
Indicadores de Inovação Tecnológica	1	1,17
Indicadores de <i>Performance</i> , Indicadores de Resultados e Indicadores de Processos	1	1,17
Indicadores de Resultado, Indicadores de Assistência e Indicadores de Desempenho	1	1,17
Indicadores de Sustentabilidade	1	1,17
Indicadores Logísticos	1	1,17
Indicadores Sociais	1	1,17
Indicadores Sociais e Medidas de Desempenho	1	1,17
Medidas de Desempenho e Critérios de Desempenho	1	1,17
Medidas de <i>Performance</i>	1	1,17
Total	85	100,00

Figura 2.2 Terminologias utilizadas para caracterizar indicadores de desempenho organizacional (NASCIMENTO et al., 2011).

Conforme citado por Zanco et al. (2011), os indicadores da qualidade devem, além de mensuráveis, possuírem um conjunto de outras características para que estes possam servir de instrumentos de apoio ao gerenciamento de um sistema de gestão da qualidade e por consequência, o gerenciamento de uma organização com um todo. As características mais importantes citados pelo autor são: objetividade, clareza, precisão, viabilidade, representatividade, visualização, ajuste, unicidade, alcance e resultados.

Camargo (2009) cita em seu trabalho uma outra abordagem deste assunto, que são os chamados indicadores de performance, que sinteticamente podem ser classificados pelos seguintes itens: qualidade, produtividade, eficiência, eficácia, lucratividade, inovação, qualidade de vida no trabalho.

Outra abordagem de medição de desempenho empresarial, por meio do monitoramento dos seus processos, produtos e serviços, é a *World Class Manufacturing (WCM)*, conceito este dos anos 80 que originaram a base da chamada Produção Enxuta, no qual estabeleciam a capacidade das empresas competiam em termos mundiais no que diz respeito à qualidade, custo e prazo de entrega. Este conceito se baseava na medição, monitoramento e controle de sete pontos chaves:

- Inventário excessivo;
- Excesso de produção;
- Aceitação de falhas ou defeitos;
- Transporte e manuseio;
- Tempo de espera excessivo;
- Alto tempo de ciclo no processo;
- Desperdício de mão-de-obra.

Tratam-se de abordagens mais amplas do tema, procurando envolver o negócio empresarial em todas as suas esferas, deixando claro que não há limitações para o assunto e tão pouco regras estabelecendo o que é certo ou errado a ser considerado quando a empresa busca o aperfeiçoamento por meio do monitoramento de suas informações. É possível concluir que processos controlados e medidos tendem a surtir melhores resultados, sejam em termos de qualidade, produtividade e custo, independente do grau em que são controlados, o importante é controlar (CAMARGO, 2009).

Berr e Formoso (2012) estudaram a aplicação dos indicadores da qualidade no segmento da construção civil, mais precisamente na construção habitações de interesse social, do qual denominaram de indicadores de conformidade de obras. O intuito deste estudo foi o de buscar propor um processo padronizado para avaliação das obras pela agência financiadora, no caso a Caixa Econômica Federal, pois foi apontando que não existia um estabelecimento de métricas padronizadas para que essas avaliações ocorressem e desta forma o sistema não podia ser retroalimentado com as lições aprendidas.

Posto isso, Berr e Formoso (2012) propuseram métricas, objetivos e por consequência indicadores, tendo como base os processos críticos de execução deste tipo de empreendimento, de maneira a minimizar estes efeitos. Por fim, eles destacam que os mesmos parâmetros desenvolvidos para utilização de órgãos externos (agentes financiadores) podem também serem utilizados pelas empresas incorporadoras para controle do desempenho dos seus processos produtivos, reduzindo a variabilidade de interpretações.

Segundo Ferreira et al. (2008), os indicadores de desempenho são instrumentos de grande importância no que diz respeito ao norteamento da empresa à luz das suas perspectivas futuras, bem como uma empresa que atua de maneira incisiva no estabelecimento de seus indicadores, podem não só alterar a maneira como as pessoas enxergam a empresa, mas também utilizar o potencial de cada um para atingir os objetivos por ela traçados. Ainda segundo o mesmo autor, uma empresa que atua baseada em indicadores, possui inclusive, uma maior credibilidade junto ao mercado, podendo atrair mais investidores para o negócio.

Um outro fator citado por Ferreira et al. (2008), que pode ser utilizado como instrumento para gestão das informações estratégicas da empresa, é a ferramenta denominada de *Balanced Scorecard* (BSC), que se utiliza da missão e das estratégias da empresa para o estabelecimento dos chamados indicadores de desempenho. Conforme citado por Ferreira et al. (2008), as empresas não podem se nortearem apenas pelos indicadores financeiros e contábeis, mas sim pelo contexto onde ela possa avaliar quais os níveis de desempenho ela se encontra e quais são os níveis que ela deseja alcançar no que diz respeito aos seus processos e produtos. Segundo Ferreira, a adoção da ferramenta pode ser sintetizada nos seguintes itens:

- esclarecer e traduzir a visão estratégica;
- comunicar e associar objetivos e medidas estratégicas;
- planejar, estabelecer metas e alinhar iniciativas estratégicas;
- melhorar o *feedback* e o aprendizado estratégico.

Segundo Brandão et al. (2008) similarmente ao que foi citado por Ferreira et al. (2008), as empresas continuam tendo como premissa para avaliação do seu desempenho, os indicadores econômicos, citados por relatórios financeiros pelo autor. Como forma da empresa abrir suas possibilidades de análise é também citada pelo autor a ferramenta *Balanced Scorecard*. Em seu estudo, o autor efetuou uma

pesquisa da percepção dos funcionários de um banco, no que diz respeito à implantação do novo modelo de gestão adotado pela empresa, tendo como ferramenta principal o *Balanced Scorecard*, no qual um dos objetivos era a avaliação de desempenho por competências, integradas ao *Balanced Scorecard* e avaliação 360°, e pode concluir que a gestão do desempenho empresarial de forma sistemática, transparente e participativa, como é o caso da gestão por meio de indicadores de desempenho, transforma as pessoas e as alinha aos reais objetivos coletivos da empresa.

O *Balanced Scorecard*, tem como principal objetivo identificar as estratégias da empresa à luz de sua missão e visão, definir indicadores de desempenho para gerenciar o alcance dessas metas estratégicas, bem como o envolvimento de todos que são afetados pelo negócio (*stakeholders*) na busca destes objetivos, no intuito de alinhar suas estratégias ao negócio efetivamente (GALAS & PONTE, 2005).

Segundo Galas e Ponte (2005), que pesquisou a aderência do *Balanced Scorecard*, às áreas de Tecnologia da Informação (TI) em algumas empresas de diferentes segmentos, identificou que o principal intuito das empresas quando da decisão de implantação do *Balanced Scorecard* foi a de ampliar a participação de todos no negócio, bem como pela necessidade de ligar o operacional ao estratégico.

Ainda segundo os mesmos autores, algumas empresas ainda não utilizam todas as potencialidades do *Balanced Scorecard*, mas ainda que utilizem de forma estratificada, ainda assim conseguem obter bons resultados, pois ainda que deficitária, há a medição de seus processos, produtos e/ou serviços, por meio de indicadores de desempenho (GALAS & PONTE, 2005).

2.1.3 Medição e aplicação dos indicadores de qualidade e desempenho pelas empresas

De acordo com Cordeiro (2007), muitas empresas, mesmo utilizando uma técnica para o alinhamento de suas estratégias às suas operações e consequentemente a definição de seus indicadores de desempenho, como por exemplo, o *Balanced Scorecard*, elas incorrem em equívocos conceituais na maneira como priorizam seus objetivos, principalmente aqueles relacionados à

produção. Em sua pesquisa, Cordeiro (2007) analisou a maneira como uma empresa de bens industriais para a cadeia produtiva priorizava seus indicadores de desempenho. Os resultados apontados pelo autor mostram que esta empresa dava maiores prioridades a indicadores que tinham uma baixa correlação ao seu posicionamento de mercado, com isso deixando de obter os resultados efetivos esperados. Portanto, não basta a adoção de uma ferramenta ou técnica para o desdobramento das estratégias da empresa por meio de indicadores de desempenho, mas é extremamente importante avaliar o quão este desdobramento é efetivamente capaz de elevar seu posicionamento no mercado.

Araújo (1997) faz citação a respeito de sistemas de medição como norteadores gerenciais, tendo como principal intuito o de dar maior previsibilidade aos processos da empresa e também para servir de parâmetros para a melhoria contínua, pois a partir do histórico de informações é possível melhorar a qualidade e produtividade dos serviços prestados, bem como dos processos organizacionais, bem como evitar ocorrências de não conformidades pela sistematização do processo de medição. Conforme citado pelo autor, "não se pode controlar aquilo que não se pode medir".

Araújo (1997) avaliou o efeito da adoção de um sistema de medição de processos por meio de indicadores de produtividade em uma fábrica de lubrificantes sugerindo à empresa a adoção de diversos indicadores de desempenho em seus processos, de forma que esta pudesse enxergar inicialmente em que patamar ela se encontrava e poder planejar o seu futuro a partir dos resultados apresentados, de forma a estabelecer novas metas.

Neste caso, o objetivo principal do negócio é a prestação de serviços, nos quais, conforme citado pelo autor há três parâmetros fundamentais no que diz respeito ao monitoramento da qualidade, são eles:

- 1) Medidas de resultado: Como estamos?
- 2) Medidas de diagnóstico: Por quê?
- 3) Medidas de impacto: A que custo?

O objetivo de seu estudo foi o de propor melhorias no que diz respeito a produtividade do processo de carregamento dos caminhões, que se tratava do gargalo da empresa, estudando as diversas variáveis deste processo, no qual ele chega a conclusão no seu estudo que as variáveis que mais influenciam na produtividade deste processo é o tipo de veículo utilizado, bem como o tipo da

carga, podendo com isso, estabelecer metas específicas e retroalimentar estas informações para outros setores do negócio que podem ser influenciados pelos resultados apresentados. (ARAÚJO, 1997).

Canterle e Favaretto (2008), em um estudo titulado como “proposta de um modelo referencial de gestão de indicadores de qualidade na instituição universitária”, demonstra como este tema é importante para qualquer setor da economia. Os autores citam que, a “qualidade requer visibilidade, pois não existe qualidade invisível”. Ainda segundo os autores, os resultados que possam ser conseguidos por meio da adoção de uma gestão por indicadores nas instituições universitárias, não podem se restringir a apenas aos processos internos da instituição, mas sim à sua cadeia de fornecimento, bem como a seus *stakeholders*.

De acordo com Canterle e Favaretto (2008), uma das abordagens para o estabelecimento de indicadores de qualidade para instituições financeiras é a de Juliatto (CANTERLE & FAVERATO, 2008 apud Juliatto, 2005), que estabelece como base três indicadores: indicadores da qualidade do insumo, indicadores da qualidade do processo e indicadores da qualidade do produto. Ainda conforme citado pelos autores há outras abordagens que podem ser consideradas para o processo de estabelecimento de indicadores da qualidade em universidades, como: abordagem do Sistema Nacional de Avaliação da Educação Superior (SINAES), abordagem da *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* (UNESCO).

Conforme citado por Soares e Ratton (1999), fazendo uma analogia ao painel da cabine de um avião, que norteia o comadante na execução de seu trabalho, bem como na tomada de decisões que se façam necessárias, mesmo que não sendo possível incluir todas as variáveis do processo neste painel, eles já exercem um importante papel, que é a da tomada de decisões baseadas em medições reais e *full time* do processo. Ainda segundo os mesmos autores este é o conceito que qualquer gerência precisa possuir, um painel que possua, senão todas, as principais informações da empresa para que possam tomar decisões baseadas em dados reais e quantitativos. A abordagem citada pelos autores para estruturação deste assunto em uma empresa, é a de desenvolver um sistema de medição, utilizando ferramentas de apoio denominadas de indicadores.

O sistema de medição para ser eficaz, segundo citado por Soares e Ratton (1999), devem possuir os seguintes atributos: o alinhamento às estratégias da empresa; a visibilidade do sistema em todos os níveis e para todos os interessados; o

balanceamento dos critérios de medição; a adaptabilidade do sistema às necessárias mudanças nos objetos de medição; e a abrangência do sistema. De acordo com Soares e Ratton (1999), uma ferramenta importante para o desenvolvimento deste sistema de medição é o *Balanced Scorecard*. Soares e Ratton (1999), fizeram uma pesquisa em cinquenta empresas, avaliando como estas amadureceram ao longo do tempo no que diz respeito à adoção da prática de gerenciamento de um sistema de medição, em um período de cinco anos, enviando a estas empresas um questionário acerca do assunto desenvolvido a partir de fundamentação teórica de outros autores.

Uma das conclusões citadas pelos autores é de que as empresas norteiam seus indicadores baseados em dados econômicos e contábeis, bem como a respeito dos seus processos, não tendo como foco principal a satisfação do cliente, do qual é o fator principal para o negócio. Os autores evidenciaram que essas variáveis foram sendo modificadas ao longo do tempo nas empresas.

Os principais resultados apontados acerca do assunto nas empresas são demonstrados na Figura 2.3, que demonstra as dimensões nas quais as organizações medem seu desempenho, Figura 2.4 que demonstra os fatores mais restritivos à adoção/utilização das novas práticas de medição do desempenho e Figura 2.5, que demonstra quais as metodologias utilizadas pelas empresas analisadas para medição de desempenho (SOARES & RATTON, 1999).

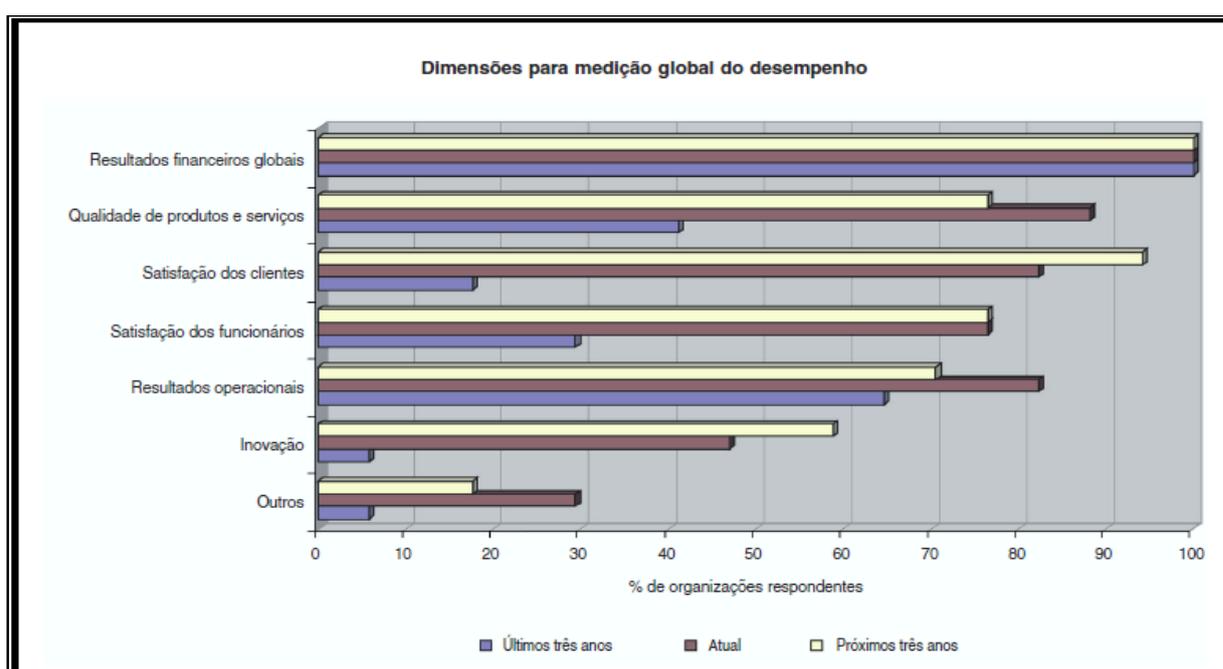


Figura 2.3 Dimensões nas quais as empresas analisadas medem seu desempenho (SOARES & RATTON, 1999).

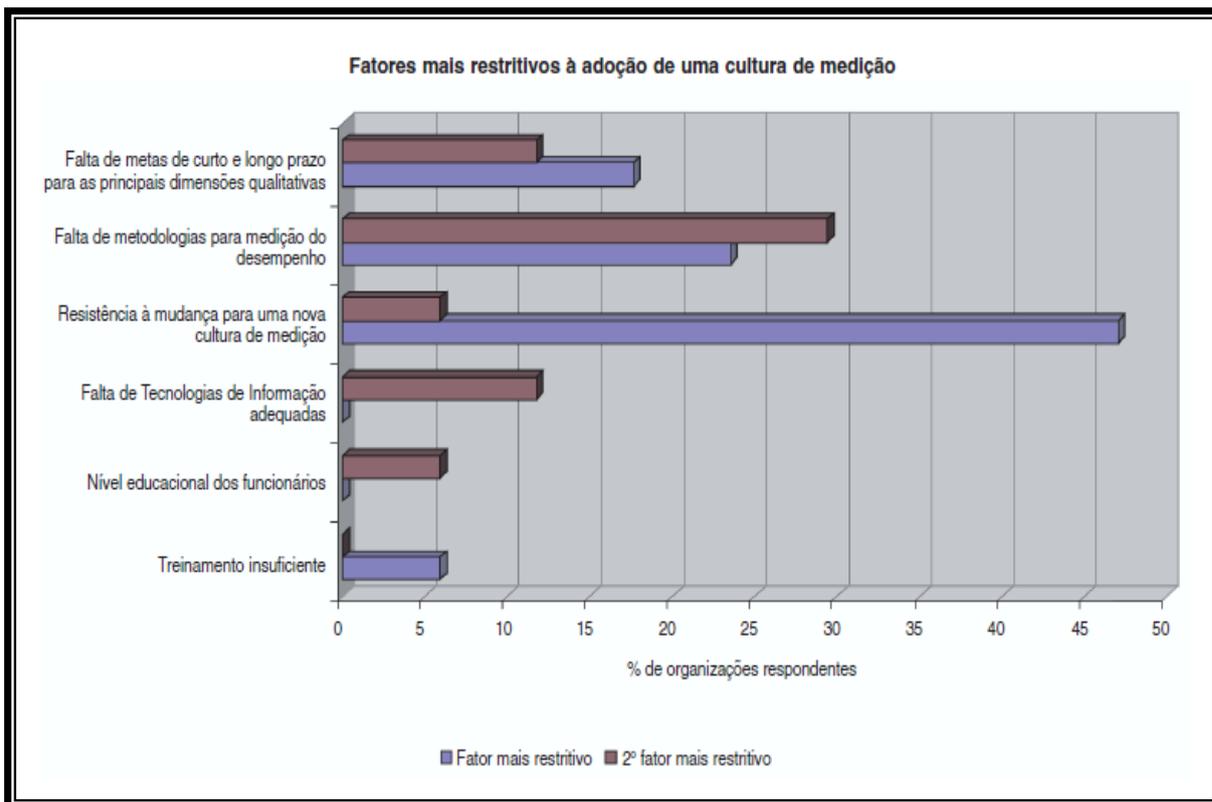


Figura 2.4 Fatores mais restritivos à adoção/utilização das novas práticas de medição do desempenho nas empresas avaliadas (SOARES & RATTON, 1999).

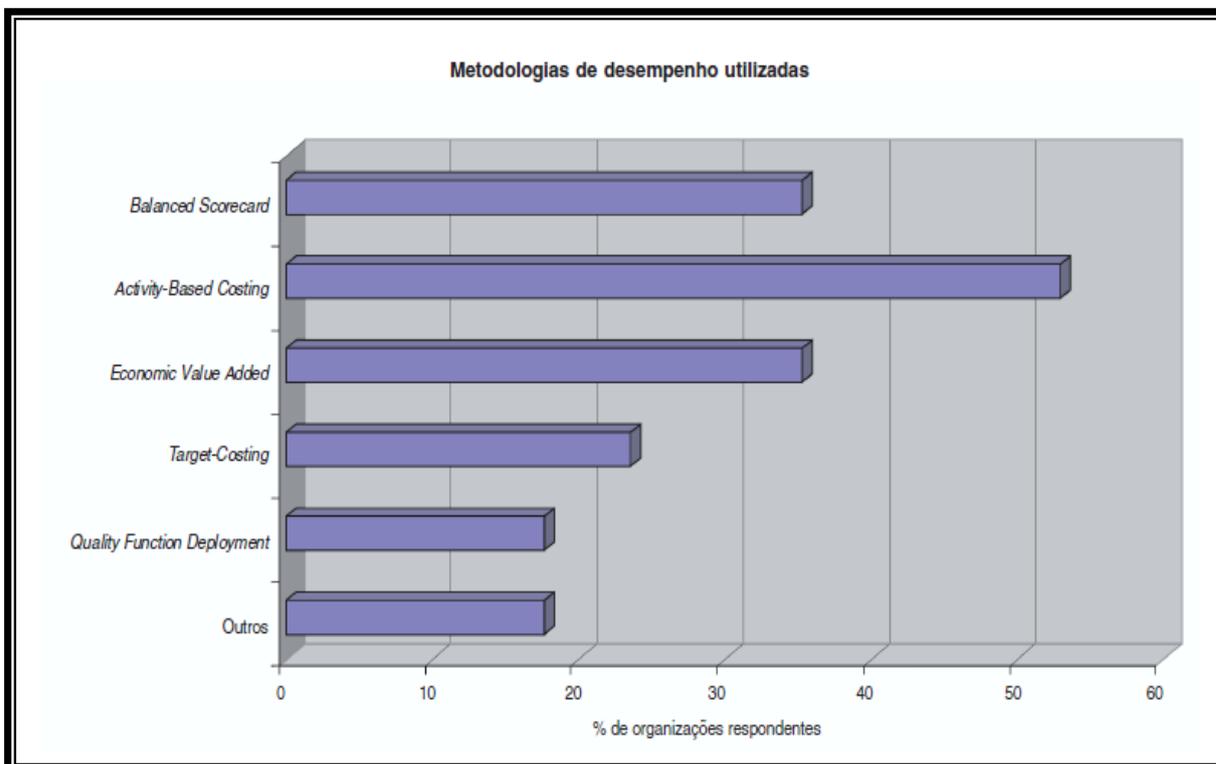


Figura 2.5 Metodologias de desempenho utilizadas pelas empresas avaliadas (SOARES & RATTON, 1999).

2.2 Aspectos de custo e a usinagem na indústria de moldes e matrizes

Segundo citado por Altan et al. (2001), a indústria de fabricação de moldes e matrizes possui relevância significativa no setor industrial, pois os principais processos de produção se utilizam deste produto para otimizar os seus processos, bem como conferir maior qualidade na fabricação de seus produtos. O mesmo autor cita alguns processos produtivos que se beneficiam da utilização de moldes e matrizes: forjamento, estampagem, injeção e etc.

O autor ainda cita que o custo dos moldes e matrizes podem conferir um percentual baixo em relação a todo o custo de produção, como por exemplo, nos processos mencionados, mas que de contrapartida são estes produtos que detém da capacidade de melhorar a performance do processo no que diz respeito a velocidade no prazo de entrega, na melhoria da qualidade do componente fabricado, bem como no custo das peças produzidas. (ALTAN et al., 2001).

Krajnik e Kopac (2004), em seu estudo a respeito do processo de usinagem denominado de *High-Speed Machining* (HSM), no qual segundo os autores conferem duas vezes mais eficiência no processo de usinagem e que um dos critérios para o alcance dessa eficiência é a utilização de moldes e matrizes, demonstram a evolução do tempo de usinagem nos últimos quinze anos. Pode-se evidenciar por meio da análise da Figura 2.6 que de 1985 a 2000, por meio da inserção de novas tecnologias nos processos de usinagem, houve um ganho de 57% em eficiência.

De acordo com Krajnik e Kopac (2004), é fator crucial para a sobrevivência da empresas o investimento em novas tecnologias no intuito de poderem conferir maior produtividade ao seu processo produtivo, conferindo alta qualidade aos seus produtos, porém a custos aceitáveis.

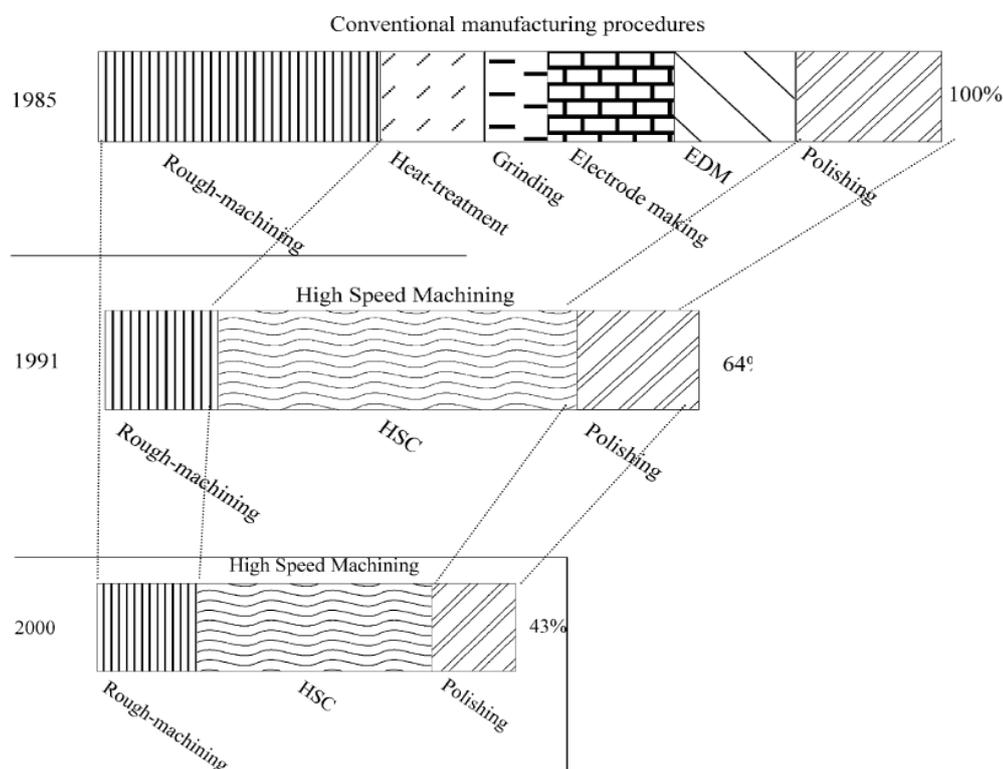


Figura 2.6 Análise do tempo de usinagem de 1985 a 2000 (KRAJNIK; KOPAC, 2004).

Segundo Reach et al. (2004), a busca da otimização dos processos de usinagem é fator primordial para a redução dos custos de fabricação, bem como a aumento na velocidade de entrega. Ainda segundo os autores, os fabricantes de moldes possui influência direta nestes ganhos.

De acordo com Reach et al. (2004) no processo de fabricação do molde, a usinagem possui uma relevância significativa no custo, e que o aço tem uma influência muito maior neste custo, no que diz respeito à sua usinabilidade, do que no próprio custo do material.

Portanto, é possível, por meio do que foi exposto, concluir que a análise do processo de usinagem na industria de moldes matrizes trata-se de um fator de extrema importância, logo, entender o comportamento do aço que está sendo usinado. Ou seja, a melhoria do aço ferramenta, pode trazer ganhos significativos para este processo, seja em relação à qualidade, produtividade e custo.

2.3 Aços para moldes e matrizes

2.3.1 Introdução sobre aços ferramenta

Os aços ferramenta constituem uma classe de ligas ferrosas, empregadas em diversas situações na indústria . Como linha geral , são materiais utilizados em moldes, matrizes, dispositivos e demais componentes mecânicos designados de maneira genérica por “ferramentas”, empregados em processos de corte ou conformação de outros materiais . Apesar de comumente aplicados no setor metal mecânico – em ferramentas de corte ou conformação de metais – os aços ferramenta também são empregados em demais setores , como a indústria de moldes para processamento de polímeros (plásticos e borrachas) ou para conformação de pós cerâmicos (Mesquita, 2004). Assim, praticamente todos os processos industriais possuem, pelo menos em alguma de suas etapas, o envolvimento direto ou indireto de aços ferramenta.

Devido às condições críticas de trabalho , a ocorrência de falhas é frequentemente observada, sendo este um aspecto que diferencia as ferramentas de outras aplicações de engenharia . Portanto, tornam-se importantes os trabalhos de melhoria de desempenho de ferramentas, de modo a não inibir a falha , mas estender a vida da ferramenta (Mesquita e Barbosa, 2008). Conseqüentemente, a melhoria de propriedades dos aços ferramenta e dos demais componentes das ferramentas são importantes, sendo assim interessante entendê-los com base na microestrutura.

Segundo Roberts et al. (1998), os aços ferramentas são produzidos a partir de um projeto de liga que contém elementos de transição, denominados formadores de carbonetos, como Cr, Mo, W e V. Nos aços para trabalho a frio tais elementos visam promover a grande fração volumétrica de carbonetos gerando alta dureza e elevada resistência ao desgaste. Por outro lado, a complexidade observada nestas microestruturas leva esta classe de aços a apresentar baixos valores de ductilidade e tenacidade, além de difícil usinabilidade.

A seguir, as classificações dos aços ferramenta são apresentadas, sendo focados os aços para trabalho a frio e, num segundo item, as influências dos carbonetos.

Conforme citado na norma ABNT NBR 6189 (1982), os aços ferramentas são capazes de adquirir, quando submetidos a tratamentos térmicos adequados, uma ou mais das seguintes propriedades:

- a) alta dureza;
- b) alta resistência ao desgaste;
- c) alta resistência ao choque;
- d) alta resistência ao choque térmico;
- e) alta resistência à perda de dureza no trabalho a quente;
- f) alta indeformabilidade.

2.3.2 Classificação dos aços ferramenta

Para os leigos, Silva e Mei (2010) cita que aço ferramenta é qualquer aço para fabricar ferramenta, porém ele destaca que não é uma classificação plausível, pois há inúmeras aplicações para aços ferramentas que não a de fabricar ferramentas.

Segundo Silva e Mei (2010), é impossível definir apenas uma classificação para aços ferramenta de forma a satisfazer usuários e produtores, pois estes podem ser classificados por sua composição química, por sua característica de emprego e tipo de tratamento térmico.

A SAE/ABNT classifica os aços ferramenta por meio da sua composição química. (SILVA & MEI, 2010).

A Tabela 2.1 apresenta a classificação AISI para aços ferramenta.

Tabela 2.1 – Classificação AISI dos aços ferramenta

Aços para trabalho a frio	
O	Aços temperáveis em óleo (<i>Oil</i>)
A	Aços média liga, temperáveis ao ar (<i>Air</i>)
D	Aço alto carbono, alto cromo
W	Aços temperáveis em água (<i>Water</i>)
S	Aços resistentes ao choque (<i>Shock</i>)
Aços para trabalho a quente (<i>Hot Working</i>)	
H1 - H19	Ao cromo
H20 - H39	Ao tungstênio
H40 - H59	Ao molibdênio
Aços para Moldes para Plásticos	
P	Aços para moldes
Aços rápidos	
T	Ao tungstênio
M	Ao molibdênio

Fonte: (SILVA; MEI, 2010, p. 364).

Silva e Mei (2010) ressalta que é viável o profissional interessado em aplicações de aços ferramenta consultar o produtor, haja vista que este poderá recomendar e/ou desenvolver material à luz das suas necessidades.

A Tabela 2.2 apresenta a classificação dos aços ferramenta conforme a norma ABNT NBR 6189 (1982).

Tabela 2.2 – Classificação ABNT NBR 6189 dos aços ferramenta

Grupo geral	Sub-grupo	Símbolo
1. Aços rápidos	1.1 ao molibdênio	M
	1.2 ao tungstênio	T
	1.3 outros	R
2. Aços para trabalho a quente	2.1 ao cromo	H1
	2.2 ao tungstênio	H20
	2.3 ao molibdênio	H40
	2.4 outros	C
3. Aços para trabalho a frio	3.1 ao carbono	W
	3.2 alto carbono e baixa liga	O
	3.3 alto carbono e média liga	A
	3.4 alto carbono e alta liga	D
	3.5 resistentes ao impacto	S
	3.6 aços para moldes	P
	3.7 outros	L

Fonte: (ABNT NBR 6189, 1982, p.2).

2.3.3 Aços da série D em ferramentas de trabalho a frio

Os aços da série AISI D são utilizados para as aplicações mais críticas de trabalho a frio, pois possuem alta resistência ao desgaste a frio e atingem elevada dureza, normalmente da ordem de 60 HRC (Roberts et al., 1998). Nestas aplicações, também vem sendo muito empregado um novo aço desenvolvido pela empresa Villares Metals (Mesquita e Barbosa, 2001) denominado VF800AT, que possui como principais propriedades alta resistência ao desgaste associada à alta tenacidade. A tenacidade, em ferramentas de trabalho a frio, é importante para reduzir falhas por trincas ou desgaste por microlascamentos.

Em aplicações menos críticas são utilizados os aços menos ligados (Mesquita, 2004), como os aços VND e VETD (da classe AISI O ou W). Tais materiais possuem alto teor de carbono, conferindo alta dureza, porém menor resistência ao desgaste devido à menor fração de carbonetos primários – formados durante a solidificação.

Ferramentas altamente solicitadas em impacto, como facas para corte de chapas grossas ou tarugos por cisalhamento, corte de sucata, talhadeiras e placas de choque, utilizam aços de alta tenacidade. Nestas aplicações destacam-se os aços VW3 e VS7 (da classe AISI S) ou o aço VCO. São consideradas aplicações de trabalho a frio porque trabalham tipicamente na temperatura ambiente. Contudo, as solicitações quanto ao desgaste são muito menores que as das operações típicas de conformação a frio, como conformação de chapas, cunhagem ou forjamento a frio, em que os aços da série AISI D são normalmente utilizados.

Para as propriedades dos aços da série D, uma microestrutura genérica pode ser definida como a combinação de partículas micrométricas duras dispersas, em fração de 0 a 15 Vol.%, em uma matriz endurecida entre 50 a 65 HRC. Normalmente, tais partículas são carbonetos e a matriz é composta de martensita revenida (Roberts et al., 1998; Mesquita e Barbosa, 2008). Um exemplo de uma microestrutura de aços ferramenta é mostrado na Figura 2.8, sendo mostradas as partículas (claras) de carbonetos de Cr (Cromo) dispersos em matriz de diversos aços para trabalho a frio (MESQUITA et al., 2003).

2.3.4 Carbonetos nos aços para trabalho a frio

Segundo Roberts et al. (1998), carbonetos de ligas possuem elevada dureza. Estes carbonetos estão incorporados na microestrutura de aços ferramenta, porém não são todas as aplicações destes aços que requerem elevada dureza, especialmente em aplicações onde a fratura à resistência é crítica. Ainda segundo Roberts et al. (1998), como resultado, as classes de aço ferramenta evoluíram no intuito de encontrar um melhor equilíbrio das propriedades do material, incluindo a distribuição e propriedades dos carbonetos versus às suas utilizações práticas.

A Figura 2.7 demonstra a dureza de vários tipos de carbonetos presentes em aços ferramenta comparado à matriz microestrutural destes aços (destaque em verde no gráfico). Os carbonetos são partículas de elevada dureza, levando-se em conta que uma matriz temperada em um aço ferramenta, apresenta valor médio de 700 HV enquanto que carbonetos eutéticos M_7C_3 podem atingir um valor médio de 1600 HV. (ROBERTS et al., 1998).

Conforme citado por Júnior (2006), estes carbonetos são formados no processo de solidificação dos metais. Júnior (2006) cita também que há basicamente dois tipos de carbonetos: os primários, que são formados na fase líquida do aço, e os secundários, que são advindos das etapas de recozimento e revenido. Para o presente estudo, apenas os carbonetos primários (maiores) serão avaliados.

Sousa et al. (2008) citam que os carbonetos primários são os responsáveis pela elevada resistência ao desgaste desse aço, que a quebra da estrutura dos carbonetos pode ser conseguida por meio da conformação a quente dos lingotes e que quanto maior for o grau de deformação, maior será a quebra desta estrutura.

Nas Figuras 2.8 e 2.9, a diferente microestrutura destes materiais pode ser observada, obtida da referência (SILVA, et al., 2011). Devido à alta dureza desses carbonetos, espera-se uma diferença significativa de comportamento quando o aço ferramenta é usinado para a confecção do molde ou matriz, promovendo desgaste da ferramenta de usinagem em função dos diferentes volumes e distribuição de carbonetos.

Quanto maior a quantidade de carbonetos, maior a resistência ao desgaste abrasivo e menor a tenacidade a qual também depende fortemente da distribuição desses carbonetos (WEI, S. et al., 2006). Por outro lado, para aplicações de maior

tenacidade (Mesquita e Barbosa, 2005) ou cujo o acabamento superficial é polido (Shimizy e Fuji, 2003), como os aços para trabalho a quente ou moldes para plásticos respectivamente, aços sem partículas são normalmente empregados. De acordo com Silva e Mei (2010), a resistência à fadiga destes aços também está relacionada a distribuição e tamanho dos carbonetos presentes na sua microestrutura, ou seja, quanto melhor a distribuição de carbonetos, bem como quanto menor a dimensão destes, é possível obter melhores desempenhos no uso destes aços.

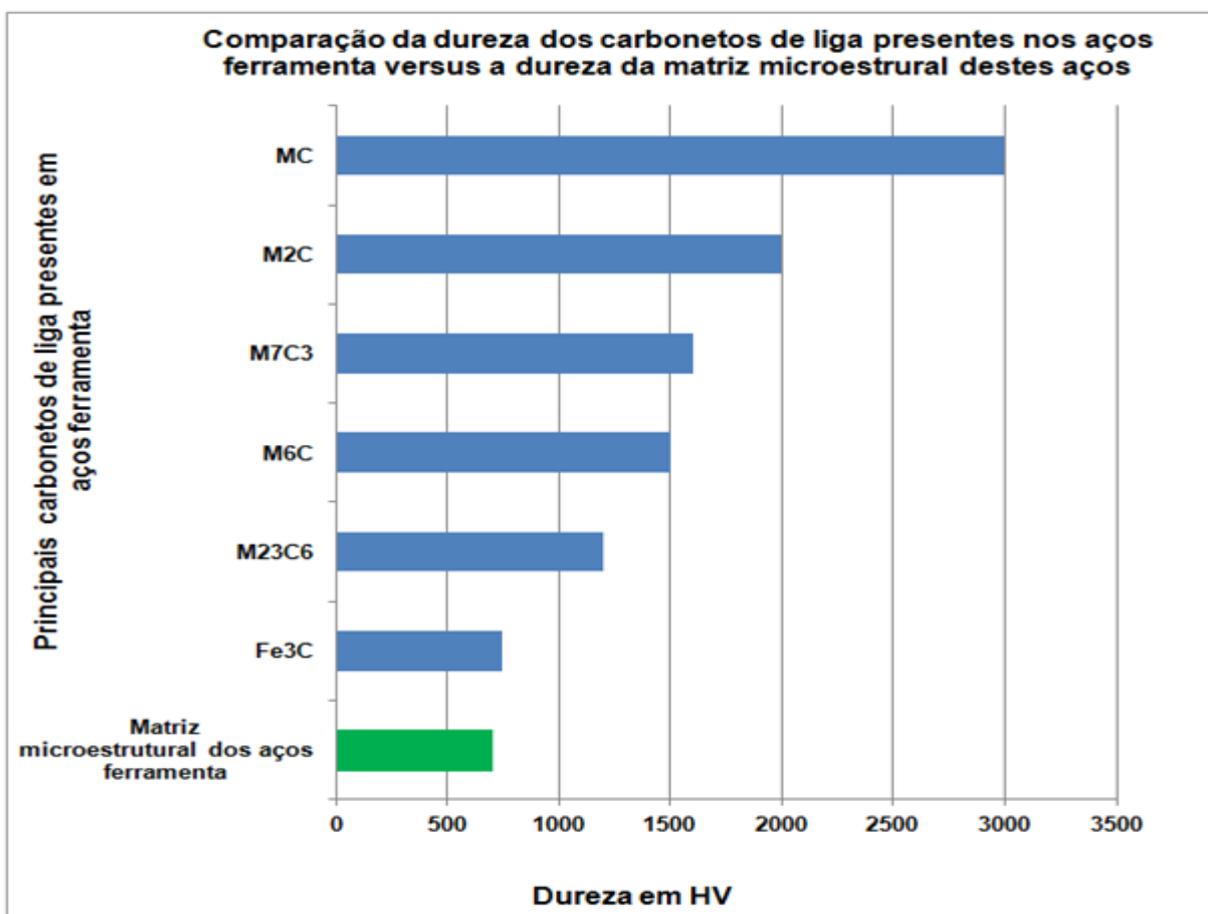
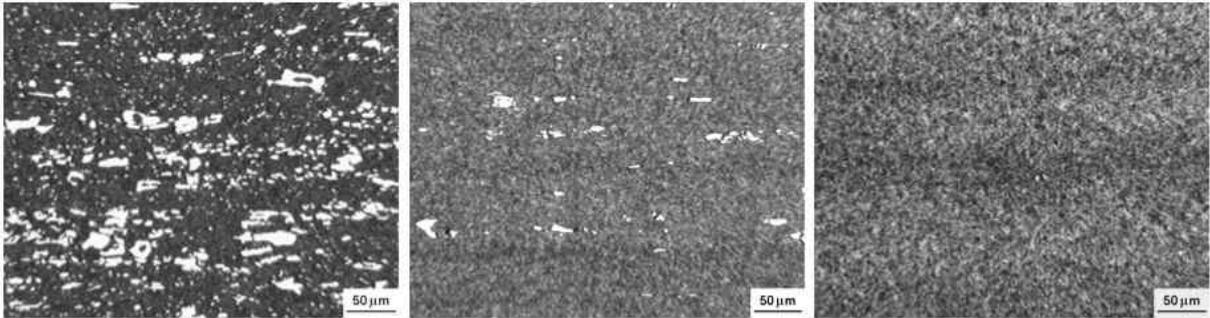
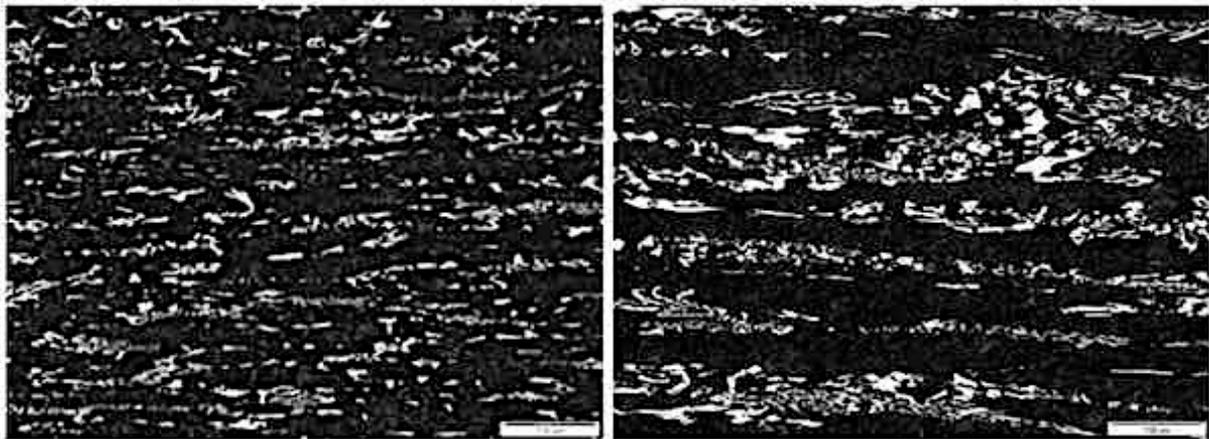


Figura 2.7 Comparação da dureza dos carbonetos de liga presentes nos aços ferramenta versus a dureza da matriz microestrutural destes aços. Adaptado a partir da referência (ROBERTS, et al., 1998).



a) VC131, 16Vol.% M_7C_3 **b)** VF800AT, 1Vol.% M_7C_3 **c)** VND, <0,2Vol.% M_7C_3

Figura 2.8: Microestrutura dos aços para trabalho a frio a) VC131, b) VF800AT e c) VND. Regiões meio raio, bitolas de 60 mm, após tratamento térmico para 60HRC. Ataque nital 4%, mesmo tempo para as micros a), b) e c) e menor tempo para a micro d). As regiões em branco são partículas de carbonetos de Cr, tipo M_7C_3 . Obtido da referência Mesquita et al., 2003. A quantidade de carbonetos tipo M_7C_3 foi calculada e é apresentada em cada foto.



a) superfície

b) núcleo

Figura 2.9: Variação da microestrutura da superfície para o núcleo de aços com alta concentração de carbonetos. Material: aço D6 (resultados do presente trabalho).

2.4 Partículas duras e o efeito na usinagem

Apesar de terem sido estudados diversos efeitos dos carbonetos, rapidamente expostos no item anterior, um fenômeno pouco estudado é a relação entre os carbonetos e o comportamento em usinagem dos materiais. Por exemplo, demais ligas metálicas tem sido estudadas quanto à presença de partículas duras em sua microestrutura e a usinabilidade do material, especialmente de ligas de alumínio e de ligas de níquel. A seguir, alguns destes poucos estudos são

discutidos, podendo ser correlacionados aos carbonetos e a usinabilidade dos aços para trabalho a frio.

2.4.1 Partículas duras em ligas de alumínio

Zhang et al. (2007) em seu estudo evidenciou que, ao incorporar carbonetos de silício ($\text{Al/Si}_p + \text{SiC}_p$) em ligas de alumínio, há um aumento significativo na dureza do material. Segundo os resultados do autor, por meio deste processo, pode-se conseguir um aumento de 20,1% a 23,1% na sua dureza da liga, e, conseqüentemente, o desgaste do material aumenta com a incorporação de carbonetos de silício do material. Esses resultados podem ser evidenciados por meio das Figuras 2.10 e 2.11.

Na Figura 2.10 o autor demonstra a alteração na microestrutura da liga de alumínio ao incorporar carbonetos ($\text{Al/Si}_p + \text{SiC}_p$). Na Figura 2.11, o autor evidencia o aumento da dureza da liga de alumínio ao acrescentar carbonetos de $\text{Al/Si}_p + \text{SiC}_p$, bem como o aumento do valor do desgaste da ferramenta (durante a usinagem do material) ao passo que a fração do volume de $\text{Al/Si}_p + \text{SiC}_p$ é incorporado ao material.

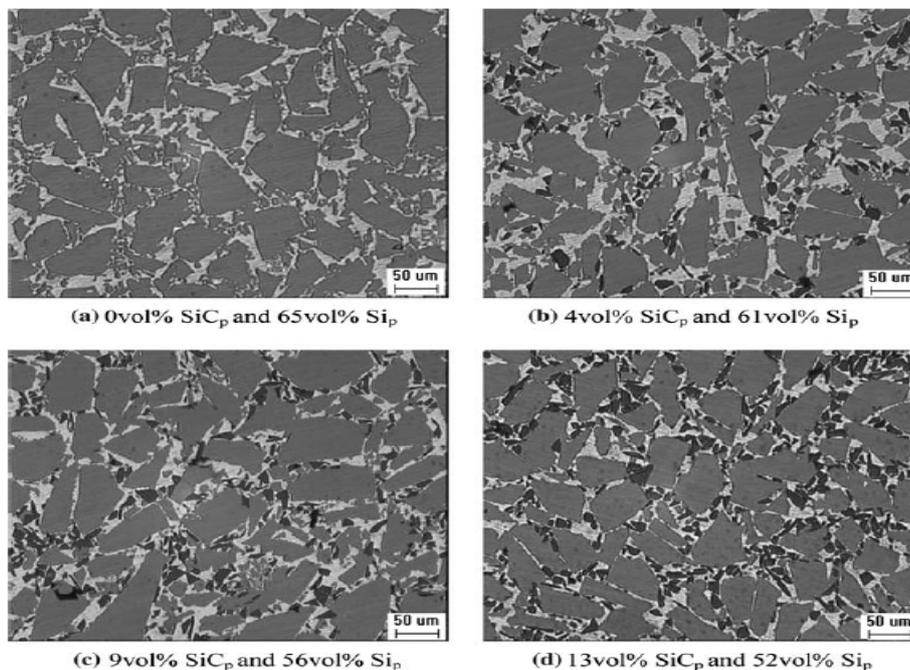


Figura 2.10: Micrografia de liga de alumínio com diferentes frações volumétricas de ($\text{Al/Si}_p + \text{SiC}_p$) (ZHANG et al., 2007).

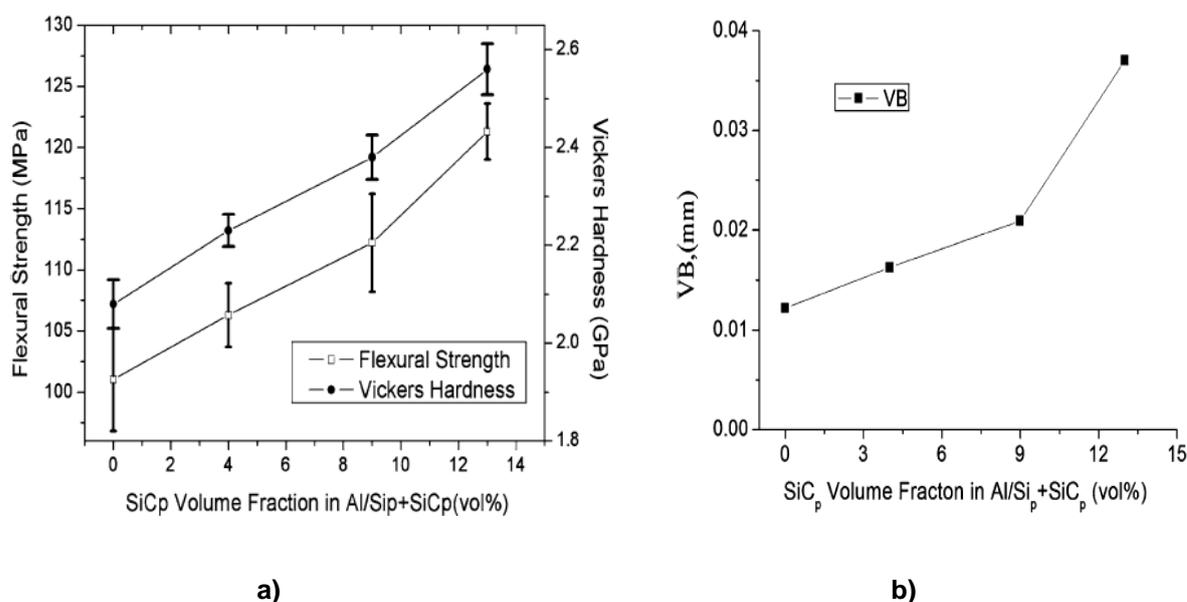


Figura 2.11: **a)** Resistência média à flexão e dureza Vickers de Al/Si_p + SiC_p e **b)** Desgaste versus fração de volume de Al/Si_p + SiC_p (ZHANG et al., 2007).

Em trabalho semelhante, Hung et al. (1996) estudaram a matriz de diversos compósitos com matriz de metal (MMCs) reforçadas com silício ou alumínio, no que diz respeito à sua usinabilidade. Uma das afirmações de Hung et. al. (1996), a partir da obtenção dos resultados do seu estudo, foi a de que matrizes com elevada dureza afeta na usinabilidade do material, encurtando a vida da ferramenta. Esse aumento da dureza do material se dá pela presença de partículas duras, carbonetos de silício na matriz microestrutural.

Kishawy et al. (2005), ainda seguindo a linha de estudo de Hung et al. (1996), compósitos com matriz de metal (MMCs), também cita em seu trabalho que compósitos com matriz metálica reforçada com partículas cerâmicas (os carbonetos), apresentam resistência ao desgaste muito maior do que as ligas não reforçadas. Ainda segundo o autor, apesar do aumento da resistência ao desgaste esse tipo de material exigirá maior trabalho da ferramenta de corte no processo de usinagem, portanto, reduzindo sua vida útil e elevando o custo do processo de usinagem. O autor ainda cita que o tamanho das partículas de reforço, sua fração volumétrica, bem como a velocidade de corte, são os principais fatores que afetam a vida da ferramenta.

Segundo Ozben et al. (2008), que estudou as propriedades mecânicas e usinabilidade de partículas de carboneto de silício (SiC-p) em um compósito com

matriz de metal (MMC) reforçada com alumínio (AlSi7Mg2-MMC), evidenciaram que conforme se eleva a adição de elementos de reforço na matriz (os carbonetos de silício), há um aumento considerável das propriedades mecânicas do material, como: resistência ao impacto, dureza, resistência à tração. Por outro lado, há um desgaste maior da ferramenta em usinagem e redução da tenacidade do material. Estes resultados podem ser evidenciados por meio da Figura 2.12.

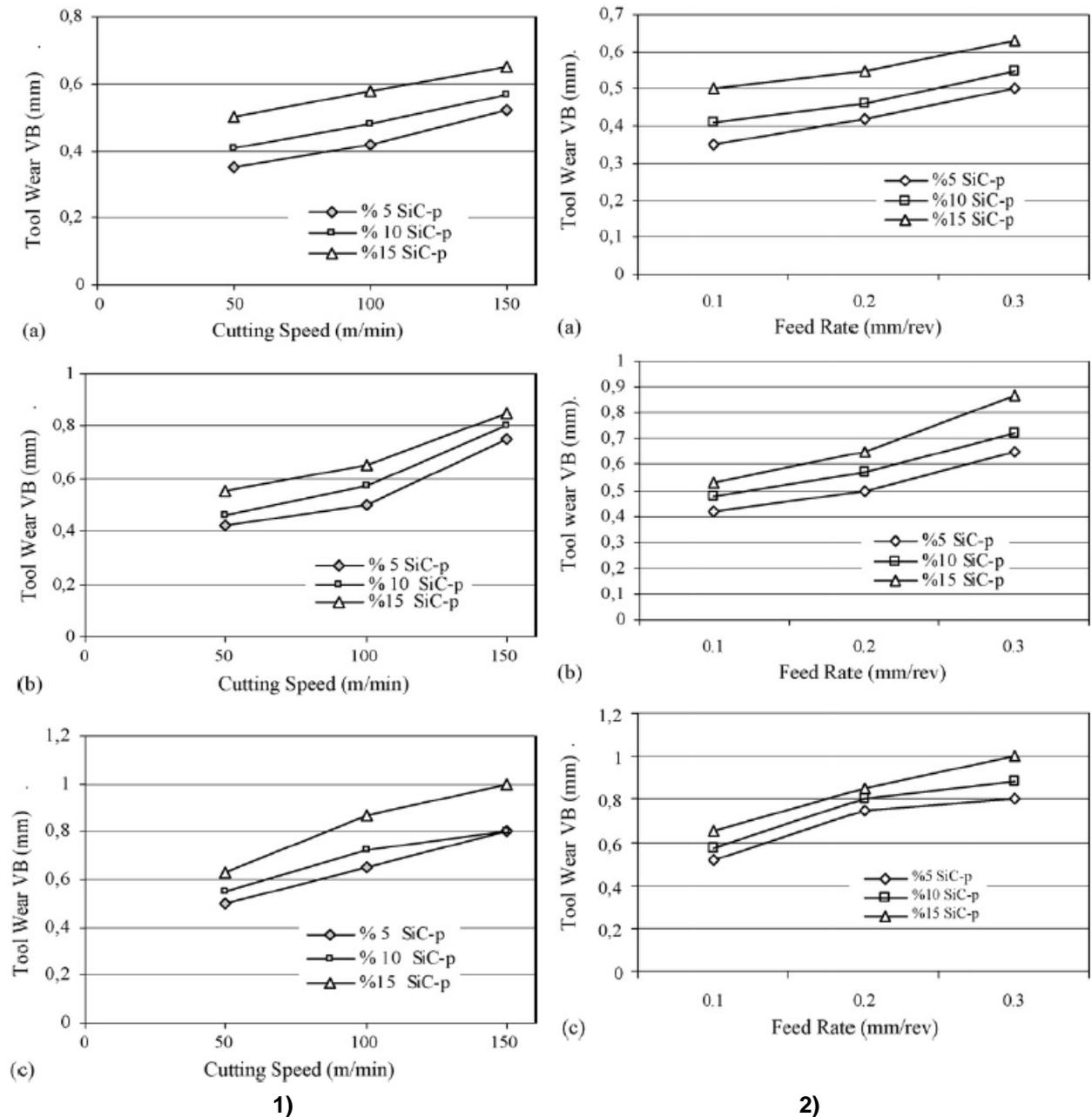


Figura 2.12: 1) Efeito da velocidade de corte sobre o desgaste da ferramenta, (a) $S = 0,1$ mm/rev.; (b) $S = 0,2$ mm/rev.; (c) $S = 0,3$ mm/rev. e **2)** Efeito da taxa de alimentação sobre o desgaste da ferramenta: (a) $V = 50$ m/min.; (b) $V = 150$ m/min.; (c) $V = 150$ m/min (OZBEN et al., 2008).

Songmene e Balazinski (1999) também afirmaram em seu estudo relativo a usinabilidade de vários compósitos com matriz de metal (MMC) com partículas de níquel revestidos de grafite (carbonetos), que existe uma melhora na propriedade mecânica do material no que diz respeito à resistência ao desgaste, por outro lado este aspecto reduz a vida útil da ferramenta em usinagem.

A Figura 2.13 mostra a curva de desgaste destes MMCs estudados pelos autores. Conforme afirmado por Songmene e Balazinski et al. (1999), quanto maior o teor de partículas duras maior é a taxa de desgaste e, por consequência menor é a usinabilidade do material.

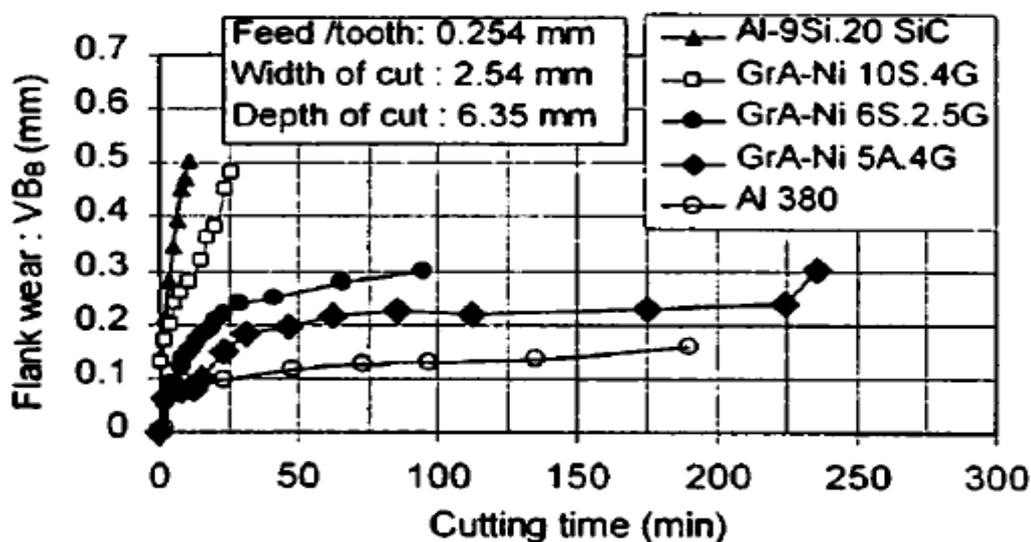


Figura 2.13: Tempo de corte versus desgaste de flanco em diferentes MMCs (SONGMENE; BALAZINSKI, 1999).

2.4.2 Partículas duras em ligas de níquel

Segundo Arunachalam e Mannan (1999), as ligas a base de níquel são largamente utilizadas na fabricação de vários componentes e estruturas para as indústrias aeroespacial militar, marítima, energia nuclear, química e petroquímica. O autor cita que as partículas duras em ligas de níquel (os carbonetos) conferem ao material uma elevada dureza, podendo ser utilizados em velocidades mais altas do que os materiais não revestidos. Porém são materiais de difícil usinagem por conta dos abrasivos duros na sua microestrutura.

Zhou et al. (2012), que estudou a usinabilidade de ferramentas de usinagem confeccionadas de uma liga à base de níquel denominada Inconel 718 em duas situações, revestidos e não revestidos, aponta que as ferramentas revestidas apresentarem maior vida útil em aproximadamente 20%.

Ezugwu et al. (1999), fizeram uma revisão bibliográfica a respeito da usinabilidade de ligas à base de níquel, em que avaliaram os diversos fatores que influenciam na usinabilidade deste tipo de material. Segundo os autores, um dos principais fatores, e o que é importante demonstrar para este trabalho, é a presença de carbonetos ou "abrasivos duros" conforme citado, neste tipo de material, elevando o desgaste da ferramenta que usina este material.

2.4.3 Partículas duras em aços ferramenta para trabalho a frio

Sobre a correlação da usinabilidade e microestrutura de aços ferramenta de trabalho a frio, não foram encontradas referências específicas na literatura. Os trabalhos de usinagem normalmente tratam os aspectos mecânicos e são mais focados na usinabilidade de materiais da série D na condição final de tratamento térmico (alta dureza); alguns exemplos na literatura: Aslan, 2005; Koshy et al., 2002; Braghini e Coelho, 2001; Siller et al., 2009. Por outro lado, a indústria emprega a grande maioria da usinagem em baixa dureza (Villares Metals, 2012), sendo assim importante avaliar o efeito da microestrutura (carbonetos) na condição de baixa dureza.

No estudo realizado por Kheirandish et al. (2010), os autores avaliaram o efeito do tratamento térmico na microestrutura do aço ferramenta para trabalho a frio AISI D3, modificando sua microestrutura por meio da alteração da sua composição química a fim de estudar os novos precipitados que se originariam desta modificação, bem como sua morfologia. É importante citar que os carbonetos padrão deste tipo de material são os carbonetos do tipo M_7C_3 .

Basicamente a modificação da estrutura foi de substituir parte do cromo, elemento de liga existente na microestrutura deste tipo de material, por nióbio e titânio em que o carboneto de cromo foi substituído por carbonetos MC. Estes materiais foram submetidos a diferentes tratamentos térmicos e a conclusão dos

autores é que os carbonetos MC não sofrem alterações significativas quanto à sua forma e quantidade quando submetidos a elevadas temperaturas, por outro lado os carbonetos do tipo M_3C , apresentam uma redução no volume e modificação na sua forma, conferindo uma microestrutura melhorada, conforme ilustrado na Figura 2.14 (KHEIRANDISH et al., 2010).

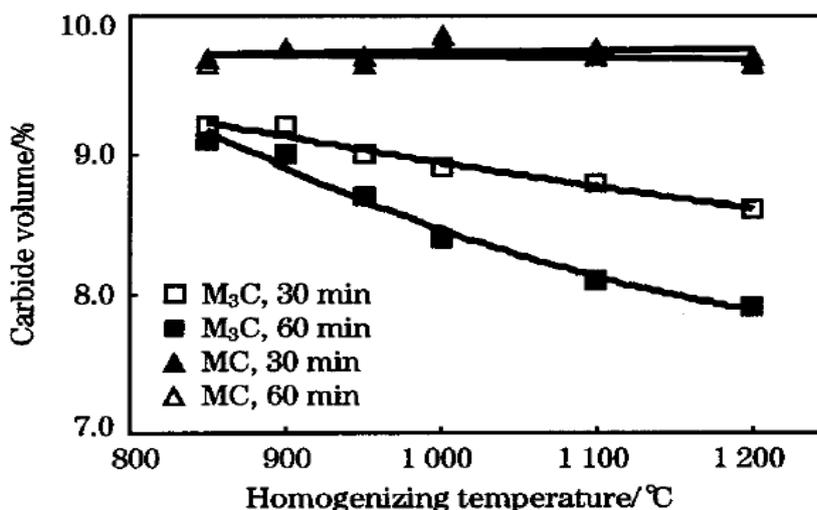


Figura 2.14: Efeito da temperatura de homogeneização no volume de carbonetos (KHEIRANDISH et al., 2010).

Segundo Camusçu e Aslan (2005), que estudaram o material AISI D3 com diferentes revestimentos, quanto ao desempenho das ferramentas de corte, no que diz respeito ao desgaste das ferramentas em diferentes velocidades de corte, apontam que é extremamente importante definir corretamente os parâmetros de usinagem para cada aplicação e/ou material usinado, pois cada material se comportará diferenciadamente durante o processo de usinagem, como pode ser evidenciado por meio das Figuras 2.15 e 2.16.

Ainda segundo os autores há um fator extremamente importante a ser considerado, o custo da ferramenta, pois uma ferramenta que possa demonstrar melhores resultados experimentais no que diz respeito a melhor desempenho de corte em termos de desgaste de flanco e acabamento superficial, pode não ser a melhor opção financeira. Portanto, é necessário correlacionar tais fatores para se chegar a uma conclusão viável (CAMUSÇU & ASLAN, 2005).

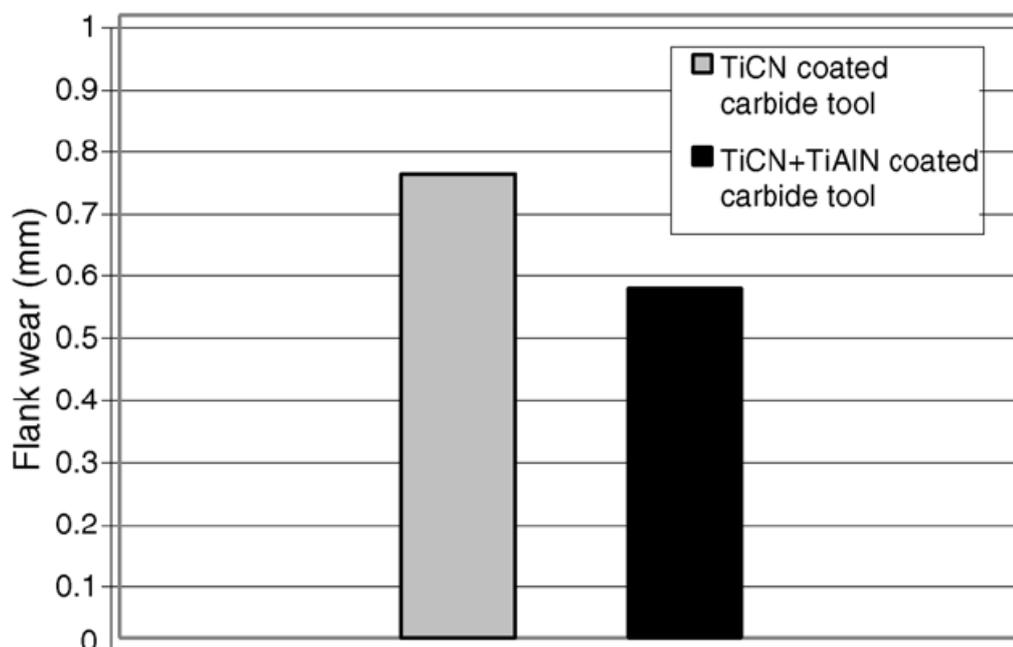


Figura 2.15: Desgaste de flanco de ferramentas de metal duro revestidos após a remoção de metais 4800 mm^3 ($V_c = 200 \text{ m / min}$). (CAMUSÇU & ASLAN, 2005).

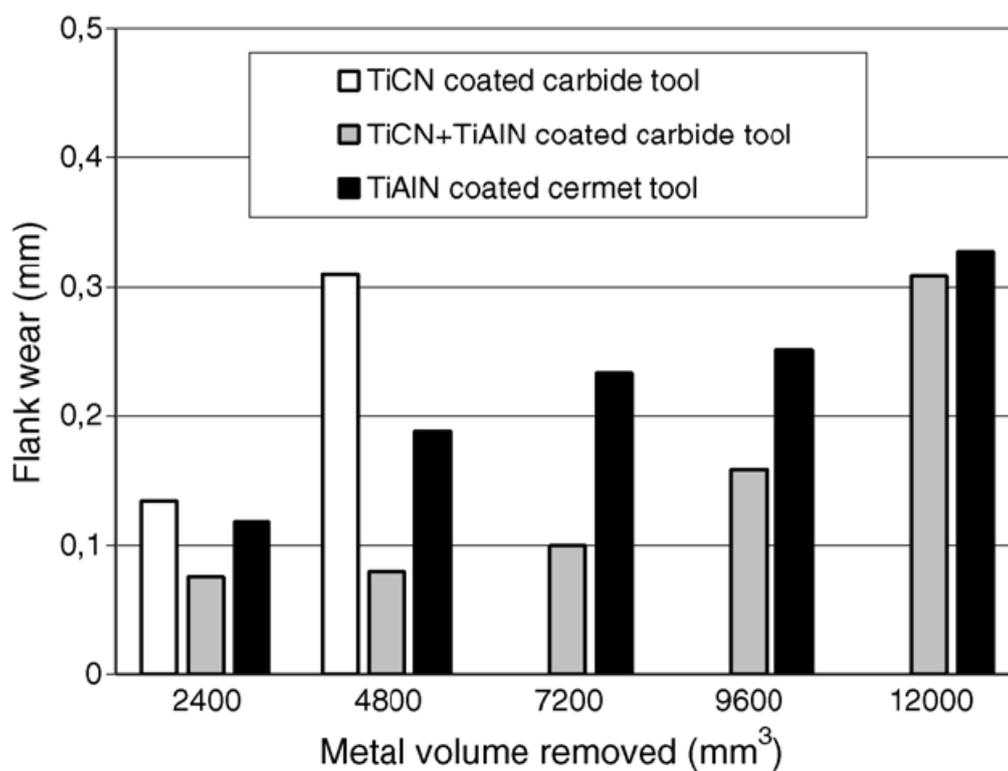


Figura 2.16: Desgaste de flanco versus o volume de metal removido com carboneto revestido e ferramentas de cerâmica ($V_c = 100 \text{ m / min}$) (CAMUSÇU & ASLAN, 2005).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção do trabalho foi subdividida da seguinte maneira:

- a) Aço para trabalho a frio estudado no desenvolvimento deste projeto de pesquisa. O material utilizado nesta pesquisa são doações feitas pela empresa Villares Metals à Universidade Nove de Julho para utilização em pesquisa acadêmica;
- b) Experimentos metalográficos, do qual para o desenvolvimento deste estudo foi concentrado em metalografia quantitativa, que se trata de uma técnica utilizada na caracterização de metais. Esta técnica fornece meios de quantificar a microestrutura, cujo objetivo é determinar a quantidade, a forma, o tamanho e a distribuição dos constituintes, fases e defeitos;
- c) Ensaio de impedância elétrica foram realizados para a conclusão sobre a formação dos aglomerados em aços ferramentas para trabalho a frio. Esta técnica não destrutiva, baseia-se na diferença de comportamento em resistência e capacitância dos carbonetos (de natureza cerâmica) e da matriz (metálica);
- d) Ensaio de usinagem, realizados em parceria com a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), por meio de fresamento.

A Figura 3.1 apresenta de maneira sintética as etapas que foram seguidas para o desenvolvimento deste trabalho.

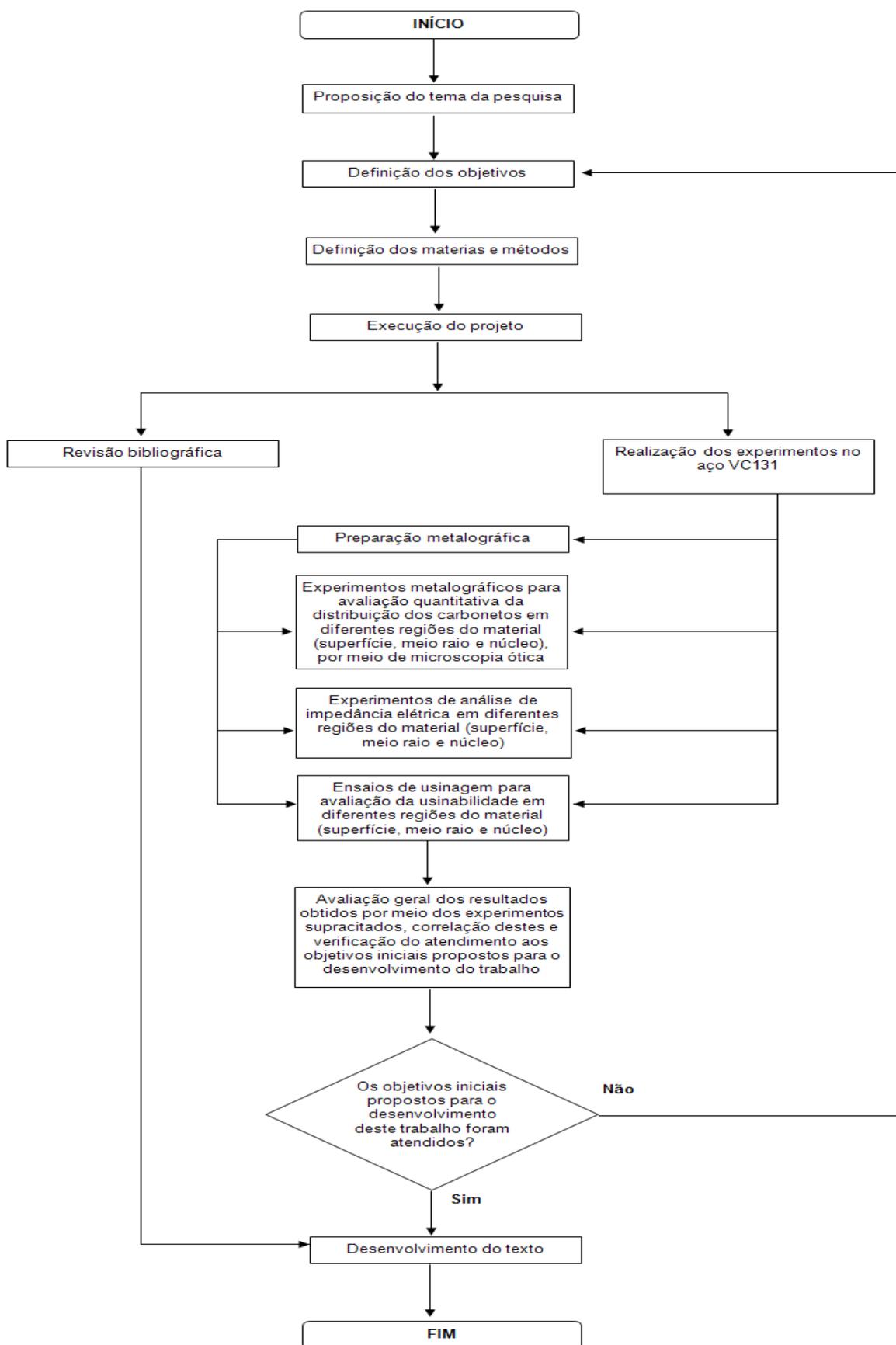


Figura 3.1: Fluxograma sintético do desenvolvimento deste trabalho.

3.1 Aço Ferramenta Estudado

Dentro da gama dos aços ferramenta para trabalho a frio, foi escolhido para o desenvolvimento deste trabalho o aço VC131 (nomenclatura Villares Metals) com seção retangular (barra chata com canto vivo) e seção circular, por ser um dos principais aços para trabalho a frio utilizado na indústria metal-mecânica. Este material é usado especialmente em ferramentas que exigem alta resistência à abrasão como: Matrizes para estampar e cunhar, laminar roscas, repuxamento, centros para tornos, punções e calibres. Sua composição química é detalhada na Tabela 3.1. Cabe ressaltar que a composição química demonstrada na Tabela 3.1 é a composição química real das amostras utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

Tabela 3.1 – Composição química do aço VC131 avaliado no presente estudo.

Aço	AISI	DIN	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	W	V
VC131 (seção retangular)	D6	1.2436	2,03	0,30	0,32	11,30	0,15	0,24	0,67	0,12
VC131 (seção circular)	D6	1.2436	2,08	0,34	0,30	11,10	0,07	0,25	0,62	0,10

A escolha do aço VC131 para o presente estudo foi baseada no alto teor de C e Cr em relação aos demais aços para trabalho a frio (ABNT, NBR 6189; ASTM, A681), o que promove a maior quantidade de carbonetos observada em aços ferramenta de uso na indústria (a relação entre o teor de C e Cr e a quantidade de carbonetos é explicada adiante, na Figura 4.18).

Foram avaliadas três amostras de 30 x 30 x 15 mm do aço VC131, a partir de um bloco produzido industrialmente com seção de 200 mm x 600 mm relativo ao material de seção retangular e três amostras de mesma dimensão, a partir de uma barra com diâmetro de 80 mm relativa ao material de seção circular. Foram avaliadas diferentes regiões do material: superfície, meio raio e centro (núcleo) nas direções longitudinal e trasverval. A denominação meio raio para o material de seção retangular é empregada apenas por simplicidade (uma vez que não se trata de material de seção circular), representando a meia-distância entre as regiões superficiais (superfície) e centrais (núcleo) dos materiais. O principal intuito foi de

avaliar a diferença quantitativa do volume médio da distribuição de aglomerados e do tamanho médio das partículas individuais de carbonetos nestas diferentes regiões do material por meio da técnica de metalografia quantitativa. O ensaio de análise de impedência elétrica, também foi realizado a fim de identificar se este comportamento (avaliação da diferença quantitativa dos aglomerados de carbonetos nas diferentes regiões dos materiais) também pode ser avaliado por meio de uma outra técnica, e esta não destrutiva. Posteriormente, foi efetuada a análise da usinabilidade do material nas mesmas regiões supracitadas. O esquema de obtenção das amostras bem como das regiões estudadas no material objeto deste trabalho podem ser observadas na Figura 3.2a relativa ao material de seção retangular e Figura 3.2b relativa ao material de seção circular. É importante destacar que foi desprezada as possíveis variações da microestrutura que podem ocorrer ao longo do comprimento do material. Para o desenvolvimento deste trabalho, as regiões analisadas nos materiais são destacadas na Figura 3.2.

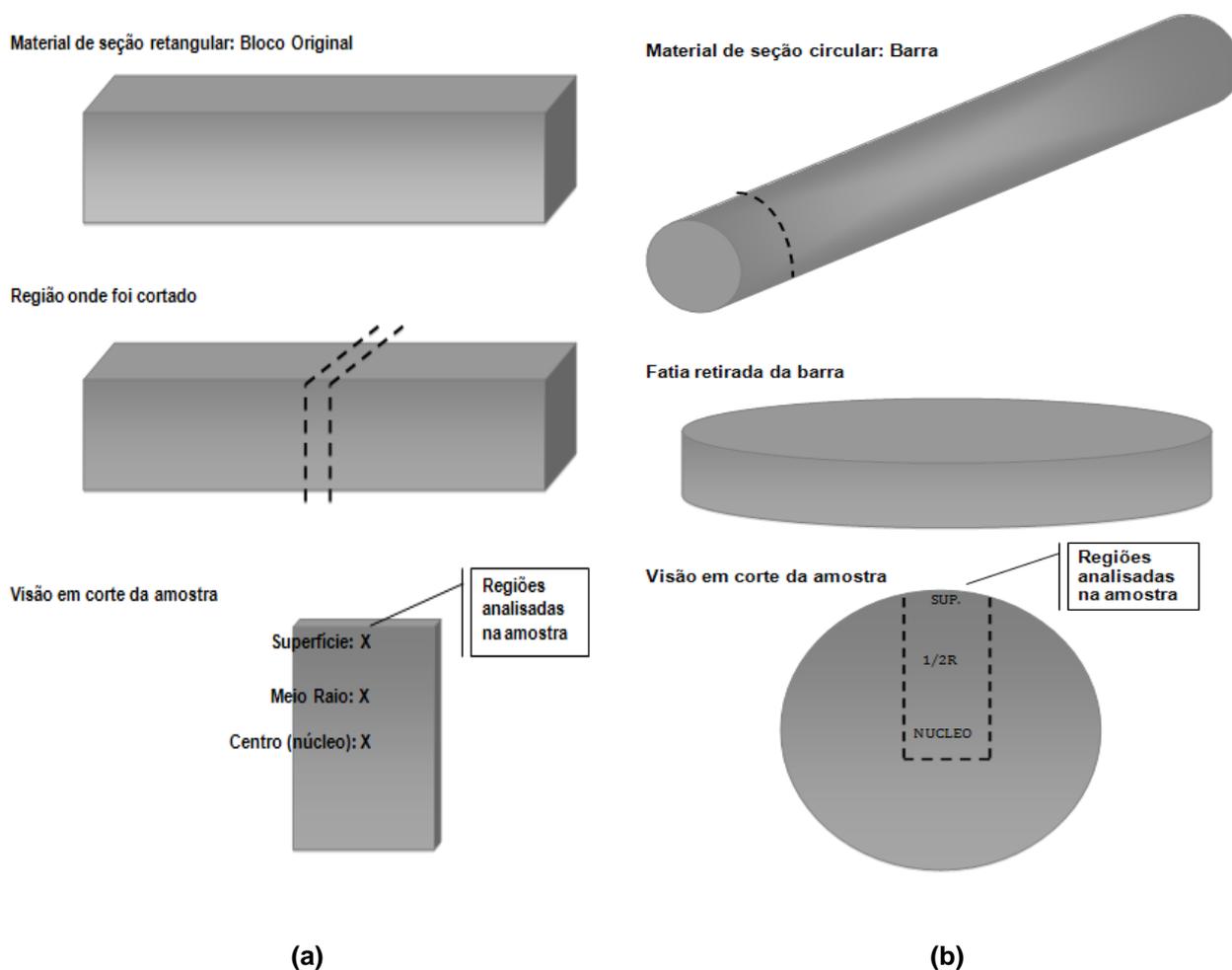


Figura 3.2: Desenho esquemático da obtenção das amostras e das regiões de estudo deste trabalho.

3.2 Experimentos metalográficos

Devido ao foco do trabalho ser na avaliação quantitativa da microestrutura, serão descritos a seguir apenas os principais detalhes sobre técnicas de metalografia quantitativa.

A avaliação metalográfica é uma importante ferramenta na caracterização dos metais, em especial dos aços e ferros fundidos (SILVA, 2008).

Ainda Segundo Silva (2008) de uma forma geral a avaliação metalográfica de um produto siderúrgico é realizada com um dos seguintes objetivos:

- Medir alguma característica micro ou macroestrutural de um item de aço ou ferro fundido.
- Testar uma hipótese relacionada ao comportamento ou desempenho de um item de aço ou ferro fundido.
- Investigar as eventuais causas estruturais de determinado comportamento ou desempenho de um item de aço ou ferro fundido.

De acordo com Silva (2008), é importante compreender claramente a diferença entre estes objetivos. A avaliação metalográfica tem por objetivo final estabelecer medidas, porém elas podem ser advindas somente da avaliação de determinadas características, ou do estabelecimento de hipóteses. Ainda segundo o autor é importante que o pesquisador não inicie o trabalho com a hipótese já definida, pois isso acarretaria em limitar as possibilidades de investigação.

De acordo com Seabra (1979) a metalografia quantitativa é um meio importante para determinar a quantidade, a forma, o tamanho e a distribuição dos constituintes, fases e defeitos. Foi exatamente esse conceito que foi utilizado para o desenvolvimento deste trabalho. Ainda segundo Seabra, a metalografia também possui um outro importante fator, que é avaliação de parâmetros estruturais, utilizadas nas indústrias em suas rotinas de controle de qualidade.

Para o desenvolvimento dos ensaios metalográficos deste trabalho foi utilizada a técnica mais comumente utilizada (Silva, 2008), que é a microscopia ótica. Explicando de maneira sintética, essa técnica utiliza-se do emprego da luz visível que incide sobre a amostra e é refletida até o observador.

Uma das condições essenciais para a realização dos ensaios metalográficos é a preparação das amostras. Estes devem estar perfeitamente planas e com

excelente polimento, para que seja possível atingir os resultados esperados. O preparo das amostras possui um efeito direto na qualidade do trabalho. A imagem ideal a ser obtida, após ataque químico na amostra, é a diferenciação entre as fases que deseja estudar. As partes atacadas que não se desejam estudar, apareçam escuras, e áreas que possuem o foco do estudo, que comumente não refletem a luz, haja vista sua composição química, aparecem claras, às vezes, brilhantes. (SILVA, 2008).

O procedimento de preparação metalográfica foi o padrão para os aços ferramenta. Após o corte, as amostras foram lavadas, lixadas e polidas. Foi efetuado lixamento das amostras com lixas d'água de granulometria 80, 120, 240 e 600 por cerca de 5 minutos em cada uma das lixas. Para o polimento foram utilizados discos de diamante para polimento de 3 a 6 microns e de 1 micron, utilizando abrasivos (pastas de diamante) com granulometria de 1 e 6 microns onde também foi desprendido cerca de 5 minutos de polimento em cada um dos discos de diamante. Na sequência as amostras foram atacadas com uma solução de Nital a 4% (4% de ácido nítrico em álcool) durante 3 a 5 minutos.

Para a aquisição e análises das imagens, foi utilizado um microscópio óptico Zeiss, modelo Axiovert 40 MAT, com analisador de imagens acoplado. Salienta-se que foram avaliadas diversas posições no material nas regiões de análise [superfície, meio raio e centro (núcleo)]. Neste estudo foram avaliadas aproximadamente 380 imagens, somando-se um total de 122044957,20 μm^2 ou 122 mm^2 de área analisada. Consecutivamente foram realizados os levantamentos quantitativos: avaliação do volume médio dos aglomerados de carbonetos e também o tamanho médio das partículas individuais existentes no material.

Foram avaliados em média oitenta campos nas regiões da superfície, meio raio e centro (núcleo) na avaliação das imagens das amostras do material de seção retangular para a quantificação dos aglomerados de carbonetos. Foram avaliados em média oitenta campos nas regiões da superfície, meio raio e centro (núcleo) na avaliação das imagens das amostras do material de seção circular para a quantificação dos aglomerados de carbonetos.

Para a quantificação do tamanho médio das partículas individuais maiores que dois microns existentes no material de seção retangular na direção longitudinal foram avaliados 48.383 dados. Para a quantificação do tamanho médio das

partículas individuais maiores que cinco microns existentes no material de seção retangular na direção longitudinal foram avaliados 46.653 dados.

Para a quantificação do tamanho médio das partículas individuais maiores que dois microns existentes no material de seção retangular na direção transversal foram avaliados 41.360 dados. Para a quantificação do tamanho médio das partículas individuais maiores que cinco microns existentes no material de seção retangular na direção transversal foram avaliados 42.260 dados.

3.3 Experimentos de análise de impedância elétrica

A espectroscopia de impedância é uma técnica de grande utilidade para os profissionais da área de engenharia e ciência dos materiais que necessitam caracterizar o comportamento elétrico de materiais sólidos ou líquidos (iônicos, semicondutores e até mesmo dielétricos) e dispositivos eletrônicos.

De uma maneira geral, a técnica de medida consiste em colocar a amostra do material sob investigação entre dois eletrodos, aplicar um estímulo elétrico e observar a resposta resultante, do qual tem por objetivo medir as partes real e imaginária da impedância em função da frequência. (BARSOUKOV, 2005).

Os ensaios de impedância foram realizados para a conclusão sobre a formação dos aglomerados em aços ferramentas para trabalho a frio. Esta técnica baseia-se na diferença de comportamento em resistência e capacitância dos carbonetos (de natureza cerâmica) e da matriz (metálica). Assim, podem ser levantados métodos alternativos de quantificação da microestrutura, com a vantagem deste (análise de impedância elétrica) ser um ensaio não destrutivo, sendo assim interessante para o controle de qualidade do produtor e do usuário dos aços ferramenta.

Cabe salientar um ponto, sobre o grau de novidade desta técnica de impedância aqui empregada. Ao contrário da técnica de metalografia, comumente empregada em aços, não foram encontradas referências na literatura quando ao uso da impedância elétrica para avaliação de carbonetos, sendo a proposição acima obtida de maneira teórica e, posteriormente, comprovado pelos resultados obtidos.

Assim, a presente abordagem pode ser considerada inovadora, para caracterização de aços ferramenta.

As análises de impedância elétrica foram realizadas no equipamento Fluke PM 6304 – LCR Meters. Este equipamento é utilizado para testes e medições de componentes e dispositivos, tendo como principal função a realização de medidas de resistência, capacidade e indutância.

3.4 Ensaios de usinagem

Os ensaios de usinagem no VC131 (seção retangular), que foram realizados por meio de fresamento de topo, seguiram os parâmetros estabelecidos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Parâmetros dos ensaios de usinagem no aço VC131.

Descrição do parâmetro	Unidade de Medida	Valor
Avanço por dente da ferramenta	fz (mm/volta)	0,15
Velocidade de Corte	Vc (m/min)	180
Velocidade de Avanço	Vf (mm/min)	452
Rotação	n (rpm)	3012
Número de pastilhas (dentes)	Z	1
Largura do corpo de prova usinado	Lf (mm)	195
Profundidade de Corte	Ap (mm)	1
Diâmetro da Fresa	D (mm)	19
Vc, Vf, n - parâmetros utilizados nos ensaios 1, 2, 3.		
Cálculo do tempo de vida da ferramenta: $T_c = L_f/V_f$		

Foram realizados ensaios em cada região do material [superfície, meio raio e centro (núcleo)], denominados de ensaios 1, 2 e 3.

A cada 5 fresadas, ou seja, a cada vez que a fresa percorria a largura do corpo de prova ($L_f=195\text{mm}$) com $A_p=1\text{mm}$ por 5 vezes, o ensaio era parado e analisado no microscópio óptico o desgaste da ferramenta. Cada etapa de cada ensaio foi considerada como teste 1, 2, 3,...10, ou seja, no ensaio 1, no final do teste 3, por exemplo, a fresa já havia percorrido $3 \cdot 5 (A_p \cdot s) = 15\text{mm}$ de profundidade.

Os ensaios de fresamento foram realizados utilizando como máquina-ferramenta o centro de usinagem Mori-Seiki modelo SV-40 equipado com comando numérico GE Fanuc MSC-518 ¹.

¹Esta avaliação foi conduzida em conjunto com o departamento de engenharia de fabricação da Unicamp, pelo aluno André Stuart e sob a orientação do Prof. Dr. Anselmo Diniz

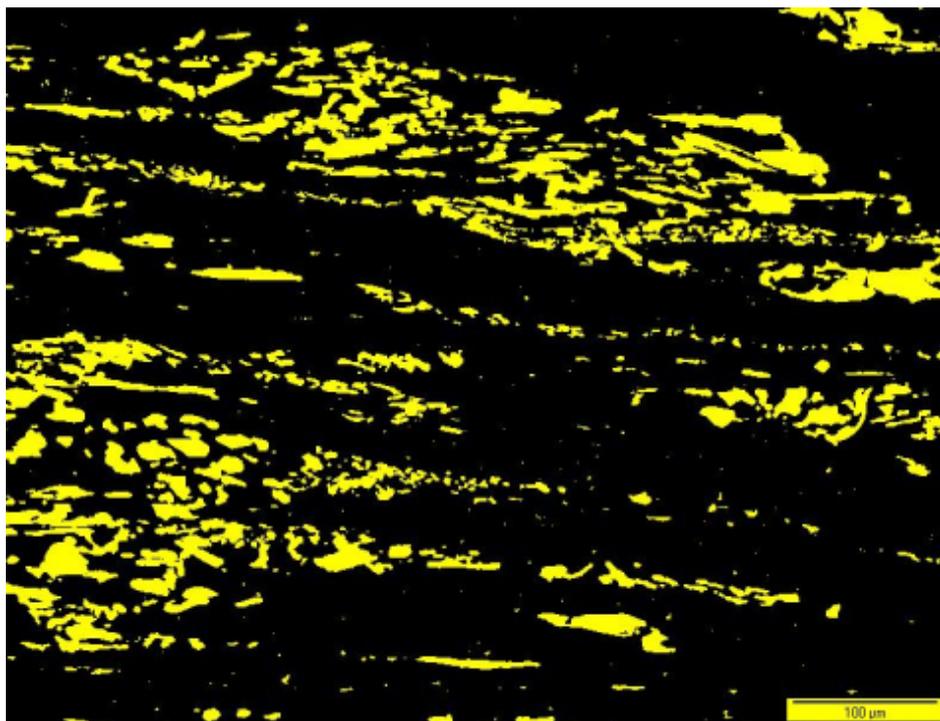
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Avaliação/resultados da metalografia quantitativa (indicador de qualidade do material em usinagem – método destrutivo)

A Figura 4.1 a seguir mostra o método de quantificação realizado. Após ataque, a microestrutura pode ser obtida com elevado contraste entre carbonetos (partículas claras) e matriz (escura). O “Software Analysis” foi então empregado para a quantificação da microestrutura. Uma análise de histograma de tons de cinza é realizada, na qual o pesquisador define quais os tons referentes às partículas e quais referentes à matriz. Na presente situação, devido ao elevado contraste, tal diferenciação foi muito simples. Portanto, a imagem binária (preto e branco) é obtida, sendo a região branca a que será avaliada pelo software. Para ilustração, as regiões a serem avaliadas são coloridas em amarelo. A seguir, por meio de recursos do software, foi realizada a quantificação dos aglomerados das partículas (neste caso os carbonetos), apresentando o resultado na tela e, também, em uma planilha eletrônica.



a)



b)



c)

Figura 4.1: Princípio das determinações realizadas pelo software de quantificação: a) obtenção da imagem em tons de cinza, com contraste entre a fase que será medida e as demais. b) seleção (manual) de qual o tom do espectro de cinza será considerado. Neste caso, a região escolhida foi destacada em amarelo. c) resultado da quantificação, colocado sobre a imagem.

A partir da aquisição das imagens pode-se realizar uma análise quantitativa e estatística do comportamento dos aglomerados e partículas individuais de carbonetos nas amostras. A Tabela 4.1 apresenta os resultados do volume médio de aglomerados de carbonetos analisados nas diferentes regiões do aço VC131 (seção retangular), sendo os resultados mais detalhados mostrados na Figura 4.2.

Resultados semelhantes para o material de seção redonda são mostrados na Figura 4.3.

O volume dos aglomerados foi calculado pelo comprimento dos aglomerados, medidos na análise da imagem longitudinal, multiplicado pela área média dos aglomerados de carbonetos, medida nas imagens transversais. Desta forma, os aglomerados podem ser considerados como pequenos "tubos" dentro da microestrutura, como apresentado esquematicamente nas Figuras 4.6 e 4.7. A análise transversal mede, portanto, um corte da seção do tubo, enquanto a longitudinal o seu comprimento. E a multiplicação de ambas medidas fornece o volume dos aglomerados.

Pode-se observar por meio de análise quantitativa das Figuras 4.2 e 4.3, bem como por análise óptica na Figura 4.6 que a variação do volume médio de aglomerados de carbonetos é proporcional à localização da amostra, isto é, existe a tendência a um agrupamento das partículas e estes aglomerados tornam-se mais uniformes, da superfície para o centro (núcleo). Além disso, tal redução de volume parece mais forte da superfície para o núcleo e torna-se menos intensa da região do meio raio para o núcleo da amostra. Cabe ressaltar que, as diferenças entre as posições analisadas nas amostras do VC131 nas duas seções [(seção retangular, Figura 4.2) e (seção circular, Figura 4.3)], são diferentes haja vista a diferença da configuração geométrica dos materiais e conseqüentemente das amostras.

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os resultados do tamanho médio das partículas individuais de carbonetos analisados nas diferentes regiões do aço VC131 (seção retangular), nas direções longitudinal e transversal do material, sendo os resultados mais detalhados mostrados nas Figuras 4.4 e 4.5. A quantificação das partículas foi realizada por meio de um módulo específico do software *Analysis*, considerando duas análises, partículas maiores que dois microns e maiores que cinco microns.

Esta análise foi realizada no intuito de identificar se, analisando o tamanho das partículas de carbonetos, também seria possível evidenciar que há variação crescente de tamanho entre as regiões da superfície, meio raio e centro (núcleo) do material, conforme evidenciado na análise da variação do volume de aglomerados de carbonetos. Foi possível evidenciar que não segue o mesmo comportamento, pois existe uma tendência de aumento do tamanho das partículas da superfície para o meio raio e, depois, uma tendência de estabilização. As barras internas existentes nos resultados apontados pelos gráficos se tratam do desvio padrão das medidas.

É importante salientar que foi possível concluir por meio dos ensaios de usinagem (seção 4.2 deste trabalho), que o desgaste da ferramenta utilizada na usinagem do material é preferencialmente causado pelos aglomerados de carbonetos existentes no material.

A Figura 4.7 demonstra por meio de um desenho esquemático o método utilizado para consideração do volume do aglomerado de carbonetos.

Tabela 4.1 Resumo do levantamento estatístico do volume dos aglomerados de carbonetos do aço ferramenta para trabalho a frio VC131 (seção retangular) nas diferentes regiões do material: superfície, meio raio e núcleo.

Região do material	Posição em relação à superfície (mm) (r)	Volume médio (mm ³)
Superfície	5	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Superfície	25	$1,8 \cdot 10^{-3}$
Meio raio (próximo à superfície)	44	$2,1 \cdot 10^{-3}$
Meio raio (próximo à superfície)	49	$2,9 \cdot 10^{-3}$
Meio raio (próximo ao núcleo)	78	$4,8 \cdot 10^{-3}$
Meio raio (próximo ao núcleo)	83	$6,4 \cdot 10^{-3}$
Núcleo	112	$8,0 \cdot 10^{-3}$
Núcleo	127	$8,2 \cdot 10^{-3}$

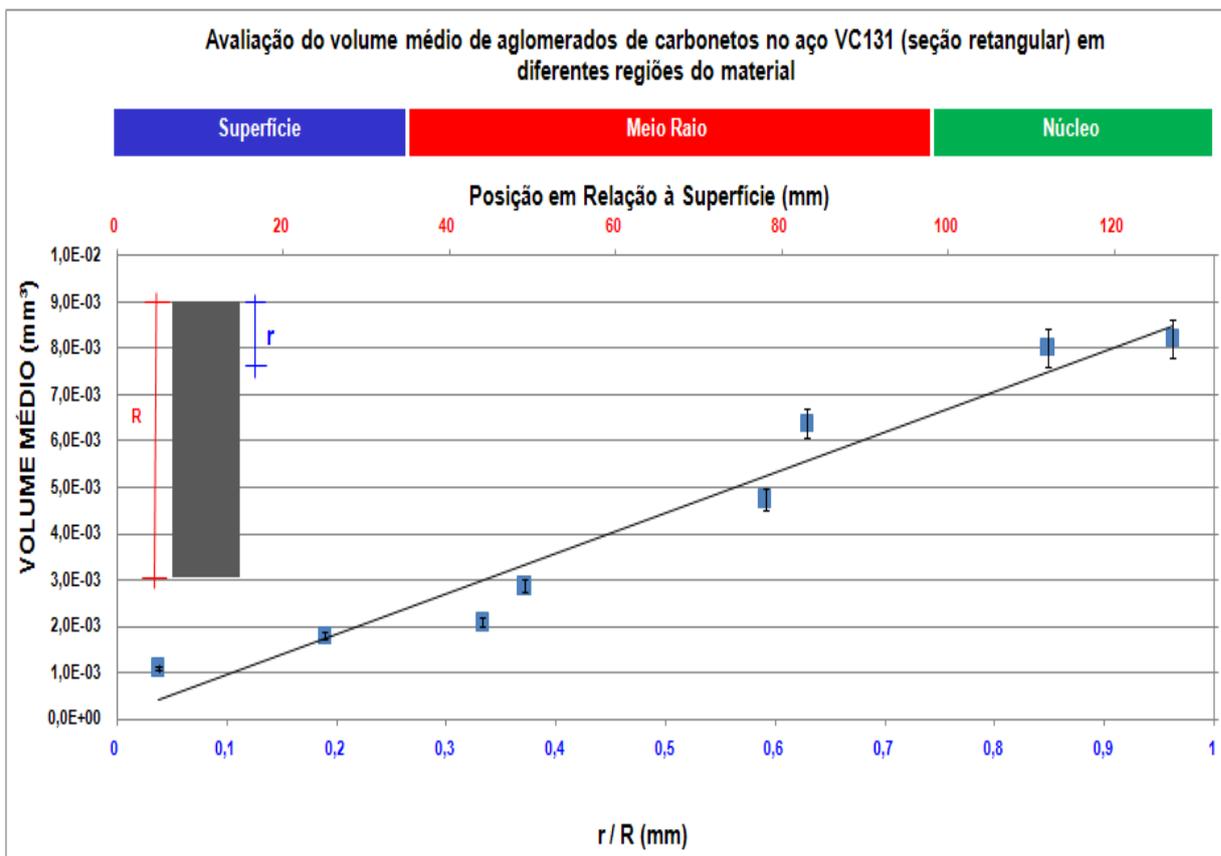


Figura 4.2: Quantificação do volume médio dos aglomerados carbonetos em diferentes regiões do aço VC131 (seção retangular). O gráfico aponta duas percepções de análise, a primeira em relação à posição do material analisado em relação à sua superfície e a outra em relação ao fator r/R , que trata-se da posição analisada em relação ao tamanho total da amostra.

Tabela 4.2 Resumo do levantamento estatístico do volume dos aglomerados de carbonetos do aço ferramenta para trabalho a frio VC131 (seção circular) nas diferentes regiões do material: superfície, meio raio e núcleo.

Região do material	Posição em relação à superfície (mm) (r)	Volume médio (mm ³)
Superfície	5	1,5 · 10 ⁻⁵
Superfície	10	7,8 · 10 ⁻⁵
Superfície	15	1,7 · 10 ⁻⁴
Meio raio	20	3,9 · 10 ⁻⁴
Meio raio	25	4,5 · 10 ⁻⁴
Meio raio	30	7,6 · 10 ⁻⁴
Núcleo	35	1,1 · 10 ⁻³
Núcleo	40	1,6 · 10 ⁻³

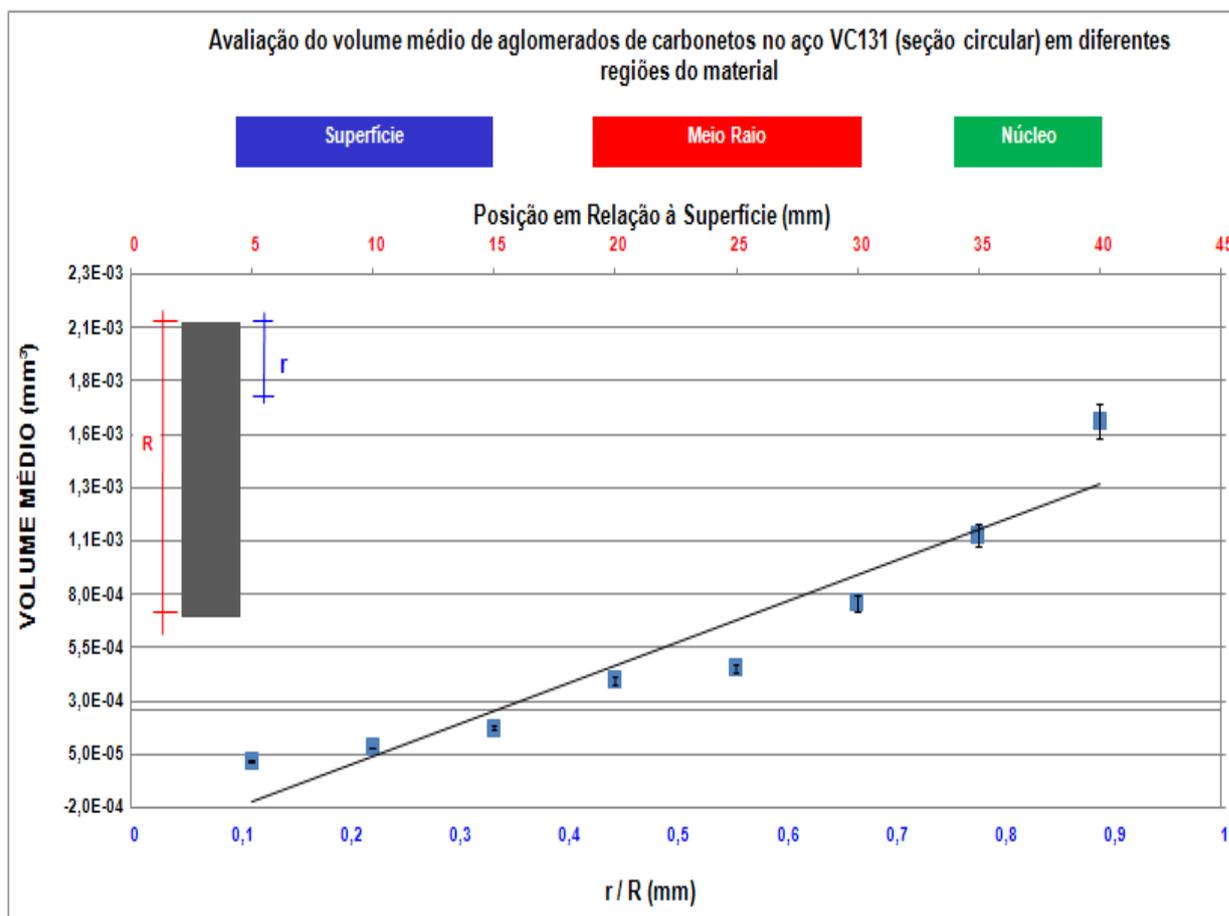


Figura 4.3: Quantificação do volume médio dos aglomerados carbonetos em diferentes regiões do aço VC131 (seção circular). O gráfico aponta duas percepções de análise, a primeira em relação à posição do material analisado em relação à sua superfície e a outra em relação ao fator r/R , que trata-se da posição analisada em relação ao tamanho total da amostra.

Tabela 4.3 Resumo do levantamento estatístico do tamanho médio das partículas de carbonetos do aço ferramenta para trabalho a frio VC131 (seção retangular) nas diferentes regiões do material: superfície, meio raio e núcleo. Seção longitudinal do material.

Região do material	Posição em relação à superfície (mm) (r)	Tamanho médio (mm) – partículas > 2 microns	Tamanho médio (mm) – partículas > 5 microns
Superfície	5	$8,15 \cdot 10^{-3}$	$8,99 \cdot 10^{-3}$
Superfície	25	$1,10 \cdot 10^{-2}$	$1,72 \cdot 10^{-2}$
Meio raio (próximo à superfície)	50	$1,06 \cdot 10^{-2}$	$2,29 \cdot 10^{-2}$
Meio raio (próximo ao núcleo)	78	$1,35 \cdot 10^{-2}$	$1,95 \cdot 10^{-2}$
Núcleo	107	$1,39 \cdot 10^{-2}$	$2,06 \cdot 10^{-2}$
Núcleo	127	$1,23 \cdot 10^{-2}$	$1,63 \cdot 10^{-2}$

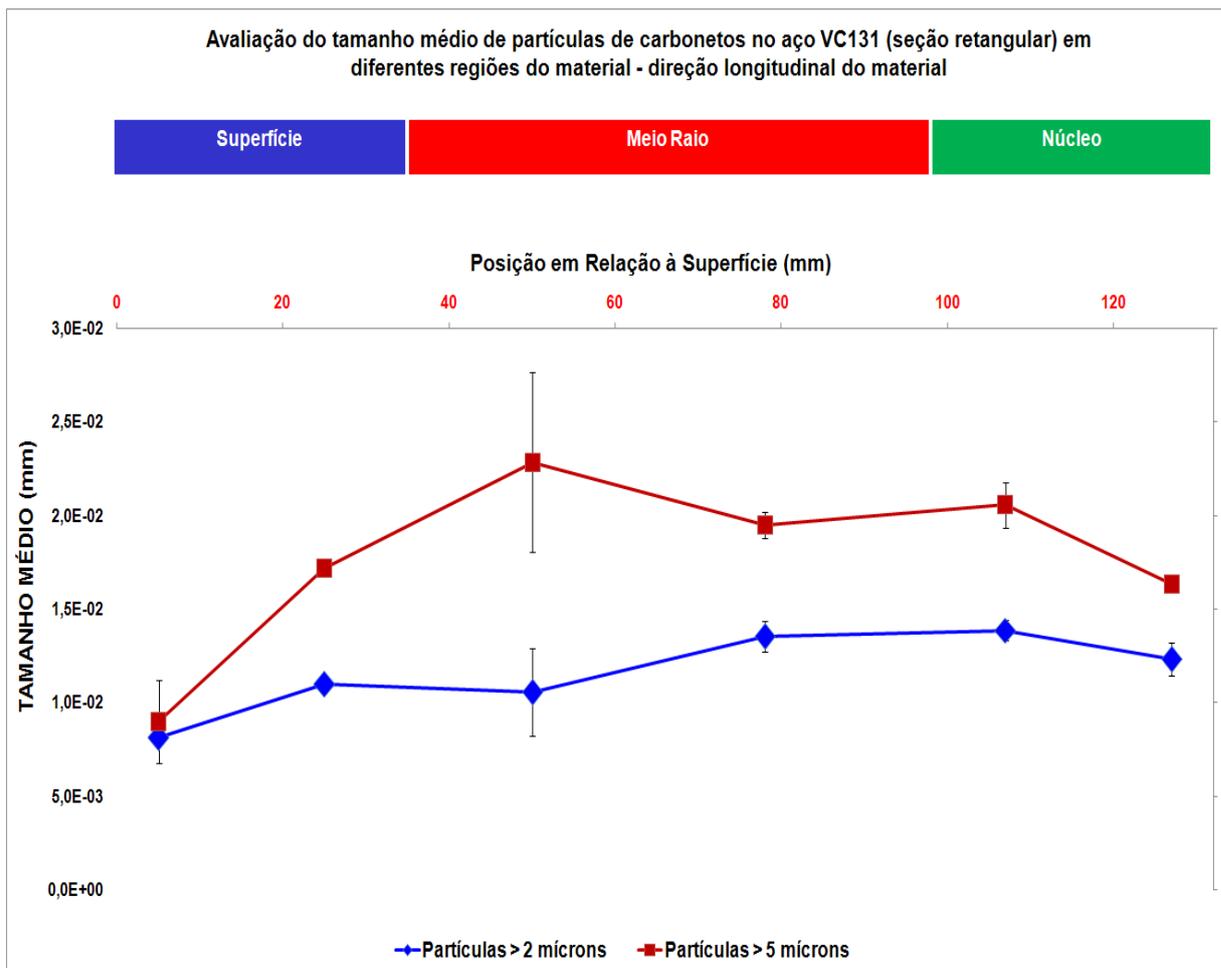


Figura 4.4: Quantificação do tamanho médio das partículas de carbonetos do aço ferramenta para trabalho a frio VC131 (seção retangular) nas diferentes regiões do material: superfície, meio raio e núcleo. Seção longitudinal do material.

Tabela 4.4 Resumo do levantamento estatístico do tamanho médio das partículas de carbonetos do aço ferramenta para trabalho a frio VC131 (seção retangular) nas diferentes regiões do material: superfície, meio raio e núcleo. Seção transversal do material.

Região do material	Posição em relação à superfície (mm) (r)	Tamanho médio (mm) - partículas > 2 microns	Tamanho médio (mm) - partículas > 5 microns
Superfície	5	5,55 · 10 ⁻³	6,19 · 10 ⁻³
Superfície	25	7,15 · 10 ⁻³	1,12 · 10 ⁻²
Meio raio (próximo à superfície)	50	1,09 · 10 ⁻²	1,51 · 10 ⁻²
Meio raio (próximo ao núcleo)	78	1,29 · 10 ⁻²	1,74 · 10 ⁻²
Núcleo	107	1,04 · 10 ⁻²	1,49 · 10 ⁻²
Núcleo	127	8,6 · 10 ⁻³	1,29 · 10 ⁻²

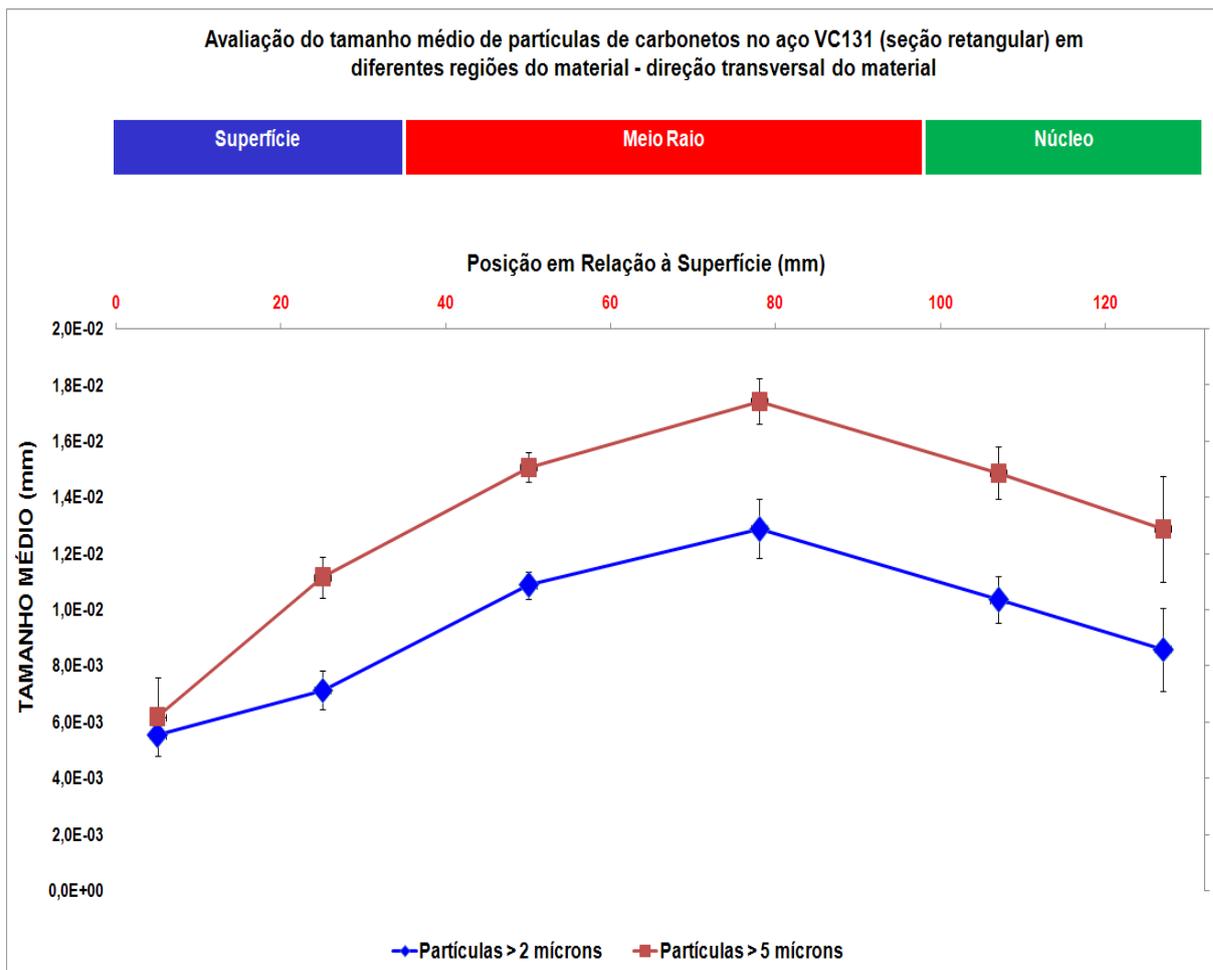
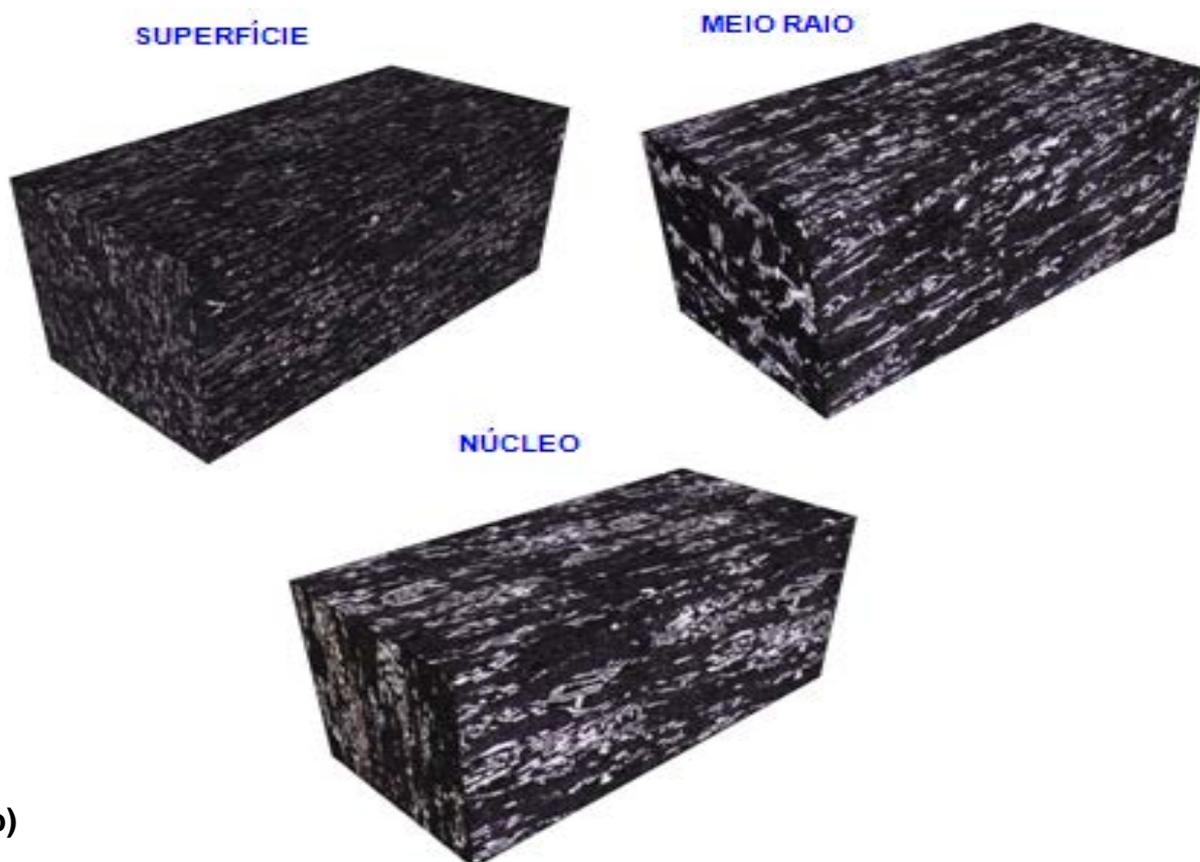
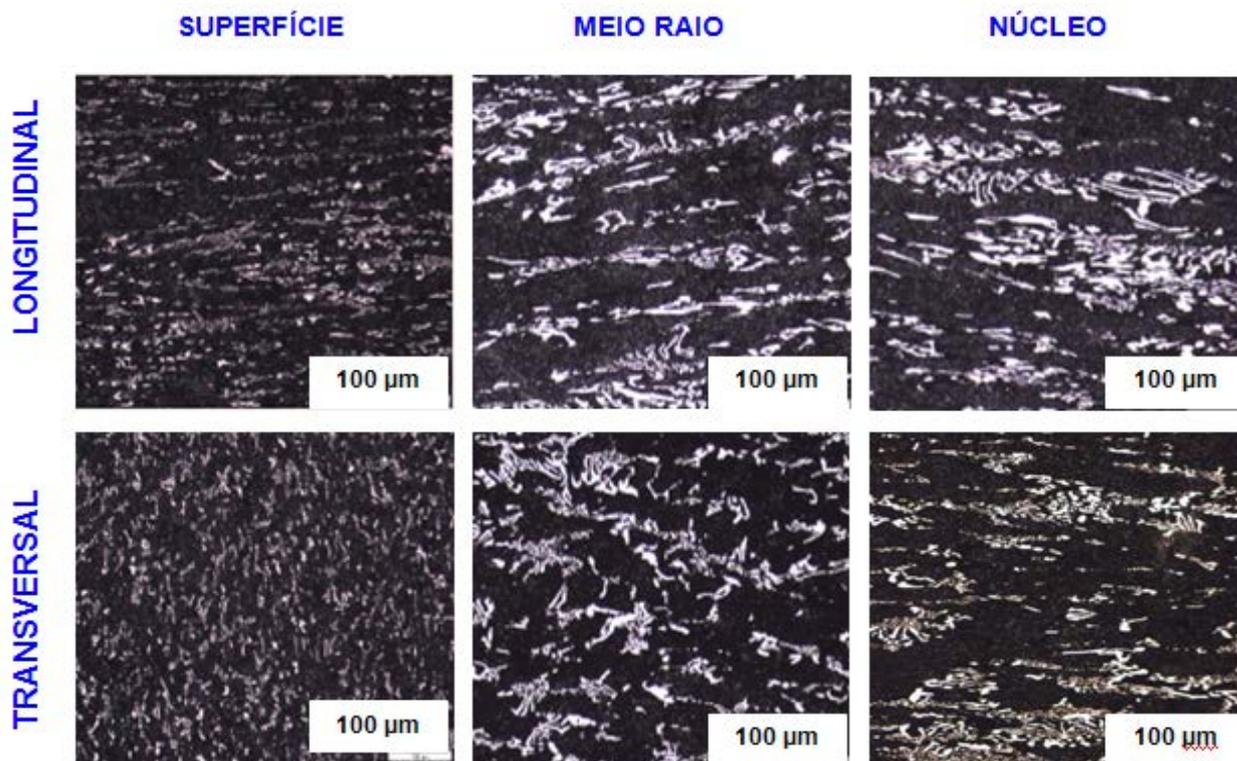


Figura 4.5: Quantificação do tamanho médio das partículas de carbonetos do aço ferramenta para trabalho a frio VC131 (seção retangular) nas diferentes regiões do material: superfície, meio raio e núcleo. Seção transversal do material.

a)



b)

Figura 4.6: Análise óptica da variação de aglomerados de carbonetos nas diferentes regiões do aço VC131. Em a) pode-se observar a variação da presença dos aglomerados de carbonetos nas diferentes regiões do material, confirmando-se a heterogeneidade química da microestrutura. Em b) é mostrada uma reconstrução tridimensional da estrutura do material para ser observada de forma mais clara o comportamento da microestrutura do material nas direções longitudinal e transversal.

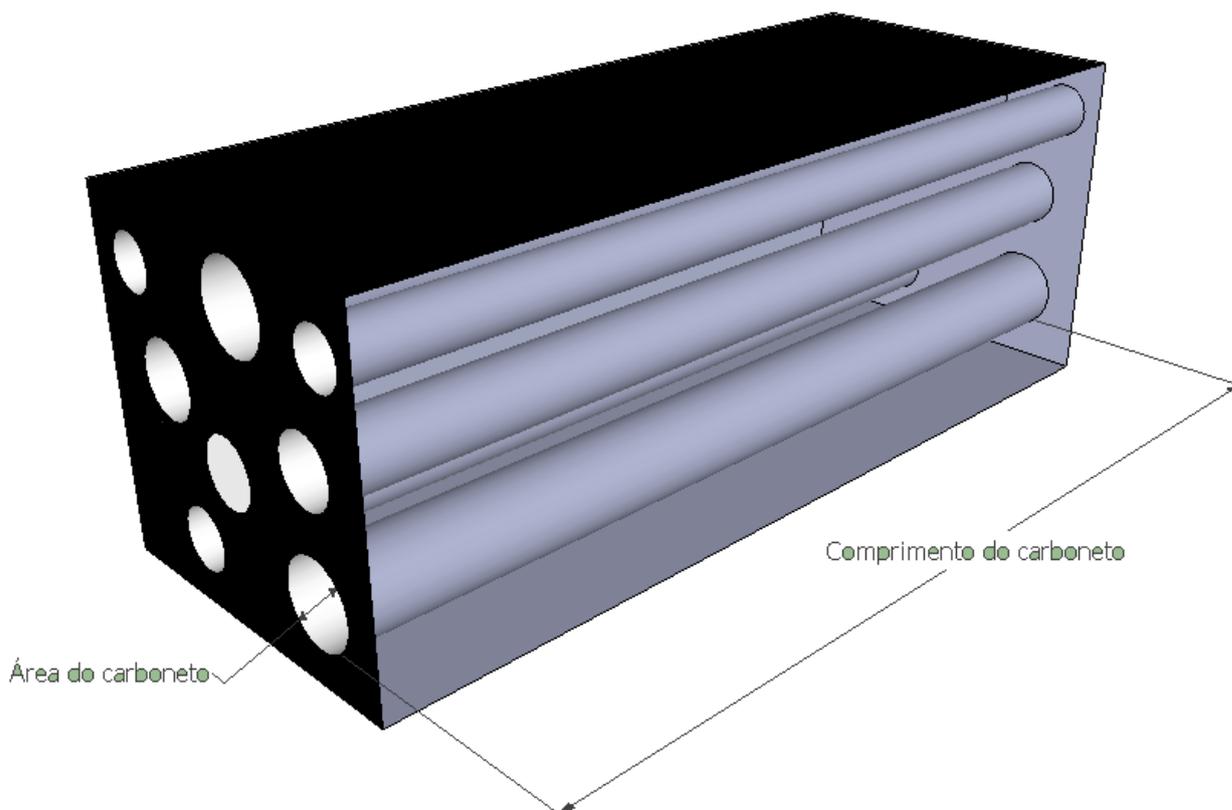


Figura 4.7: Desenho esquemático do método utilizado para quantificação do volume dos aglomerados de carbonetos no aço VC131.

4.2 Avaliação/resultados das análises de impedância elétrica (indicador de qualidade do material em usinagem – método não destrutivo)

A Figura 4.8 apresenta os resultados da análise de impedância elétrica analisada nas diferentes regiões do aço VC131 (seção retangular) e a Figura 4.9 apresenta os resultados da análise da impedância elétrica analisada nas diferentes regiões do aço VC131 (seção circular). Foram realizadas análises de impedância na seção longitudinal do material.

Pode-se observar por meio de análise das Figuras 4.8 e 4.9, que a variação da impedância elétrica no material é proporcional à localização da amostra e conseqüentemente à localização do volume de aglomerados de carbonetos. Ou seja, os aglomerados de carbonetos são mais concentrados nas regiões próximas ao centro (núcleo) do material gera maiores "caminhos livres" para o movimento dos elétrons, diminuindo a impedância. E o contrário ocorre na superfície, onde é mais

difícil encontrar vazios (regiões apenas metálicas) e, portanto, a impedância aumenta.

Portanto, pode-se concluir por meio dos resultados apresentados, que a análise de impedância elétrica pode ser considerada um método alternativo de quantificação de carbonetos em aços ferramenta, por demonstrar um comportamento coerente com a distribuição dos carbonetos. Com a vantagem de ser um ensaio não destrutivo. Portanto, é uma técnica interessante para o controle da qualidade do produto aos usuário dos aços ferramenta.

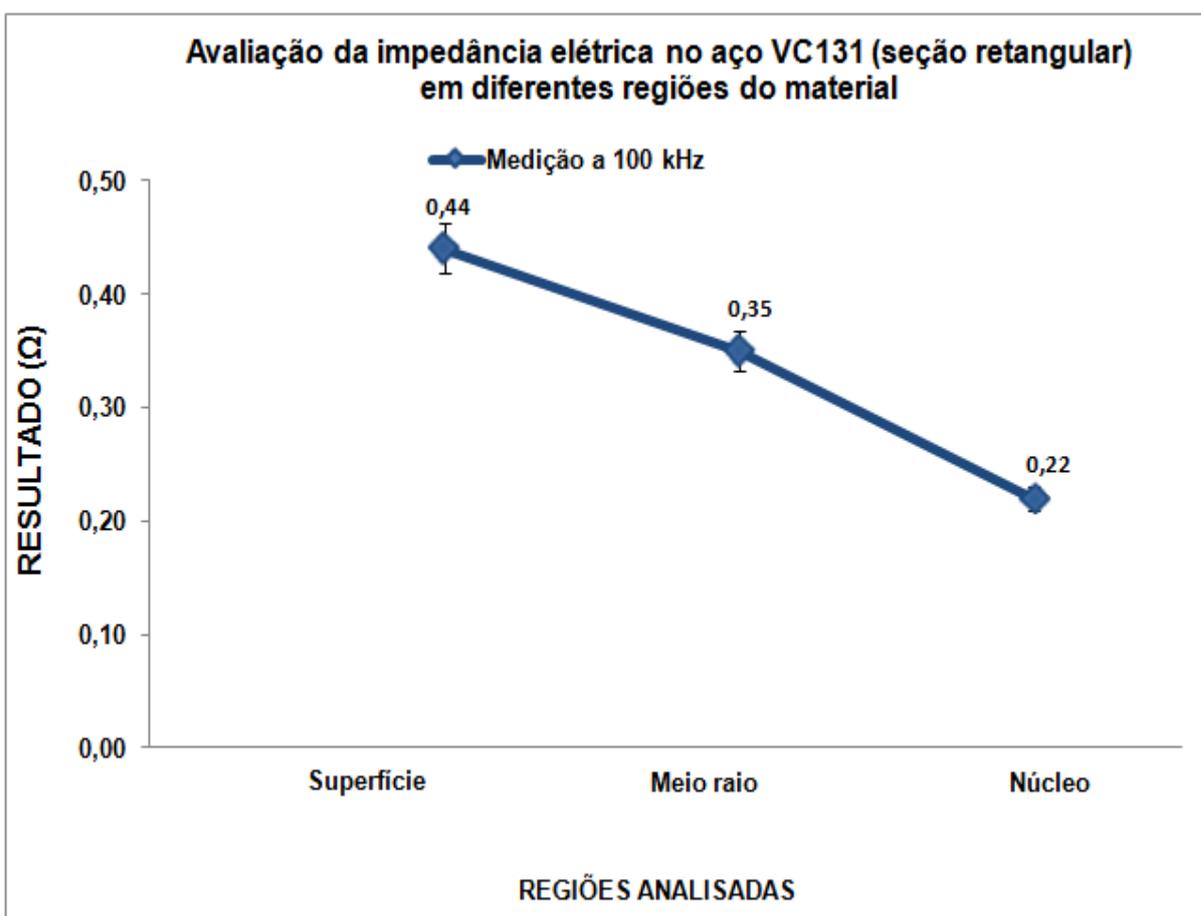


Figura 4.8: Resultados da análise da impedância elétrica no aço VC131 (seção retangular) nas regiões da superfície, meio raio e núcleo do material.

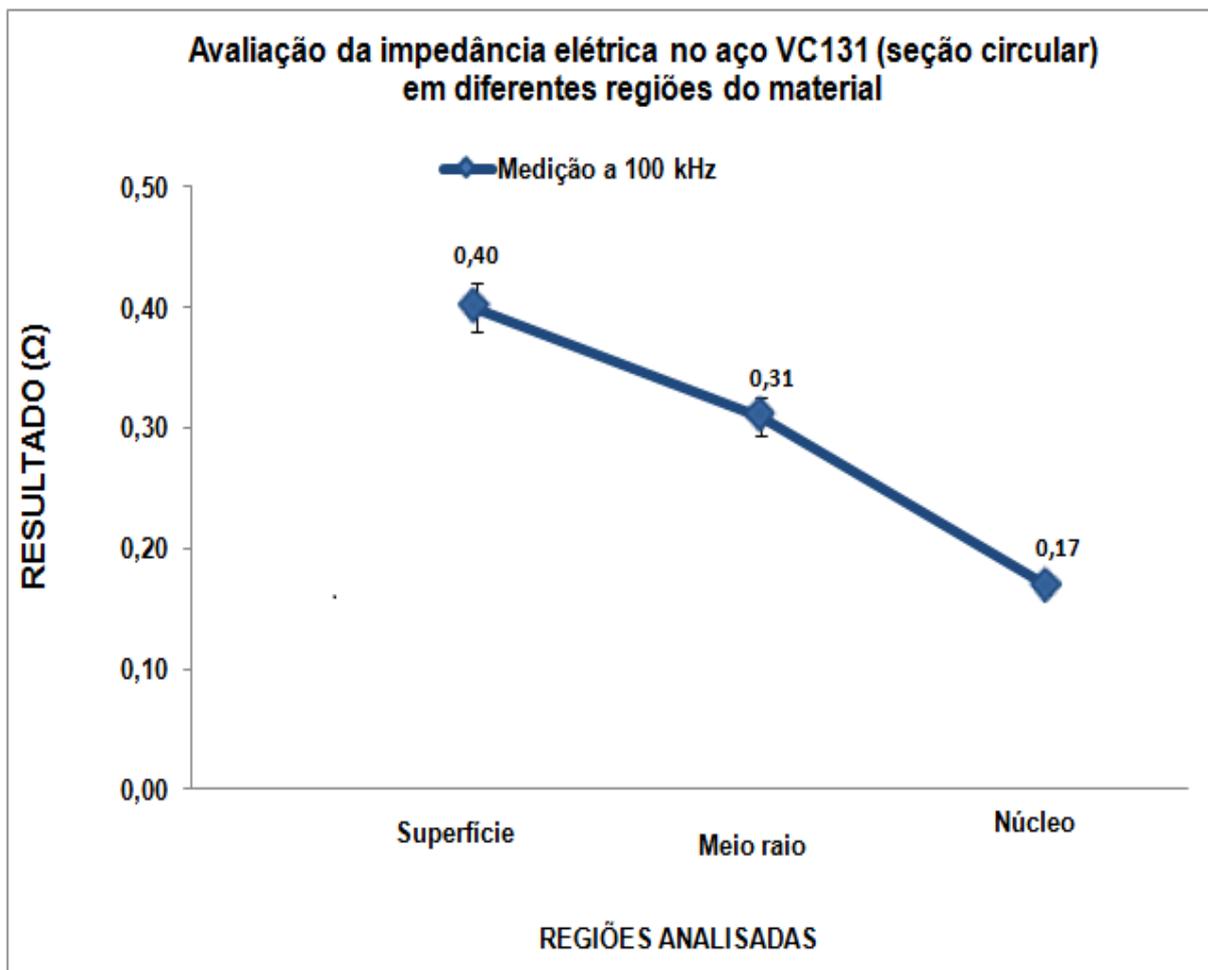


Figura 4.9: Resultados da análise da impedância elétrica no aço VC131 (seção circular) nas regiões da superfície, meio raio e núcleo do material.

Em análise aos resultados da distribuição dos aglomerados de carbonetos no VC131 (seções retangular e circular), obtidos por meio de metalografia quantitativa e impedância elétrica, é possível realizar algumas avaliações.

As Figuras 4.10 e 4.11 demonstram a relação entre a distribuição do volume de aglomerados de carbonetos versus a impedância elétrica em diferentes regiões do aço VC131 (seções circular e retangular do material, respectivamente).

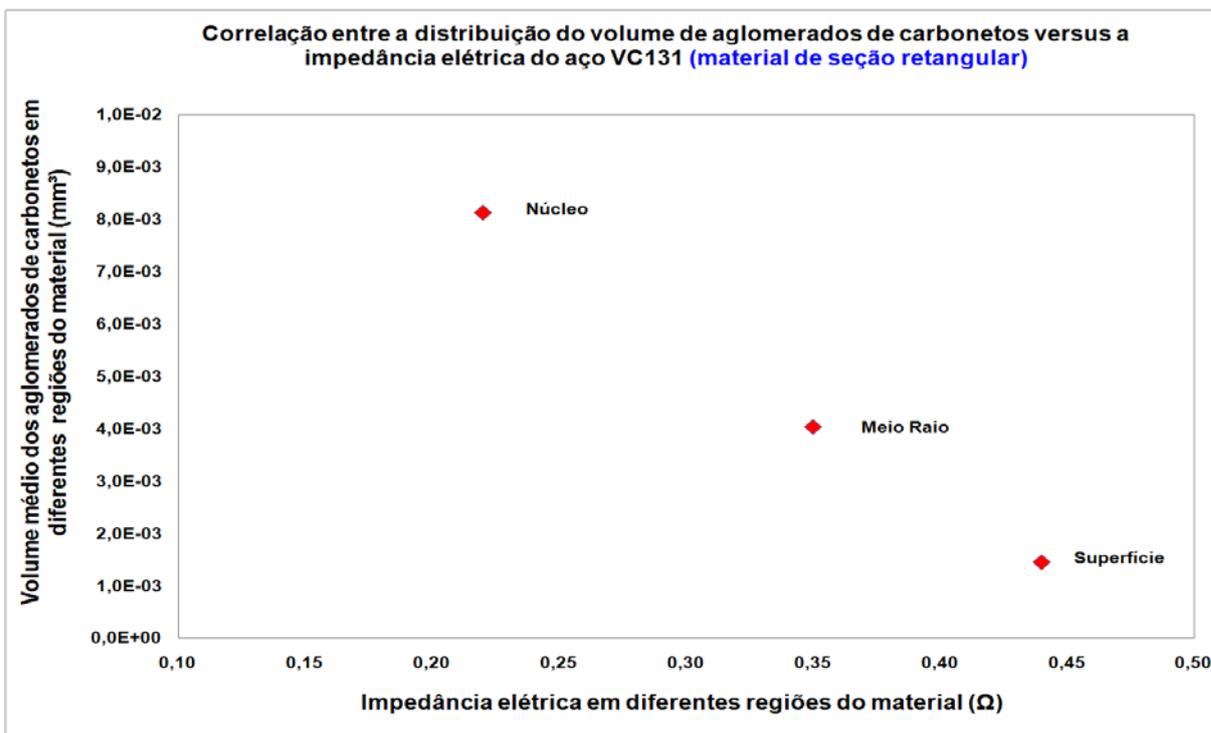


Figura 4.10: Correlação entre a distribuição do volume de aglomerados de carbonetos versus a impedância elétrica em diferentes regiões do aço VC131 (seção retangular). Coeficiente de variação (desvio padrão/média) das medidas de volume em torno de 3%.

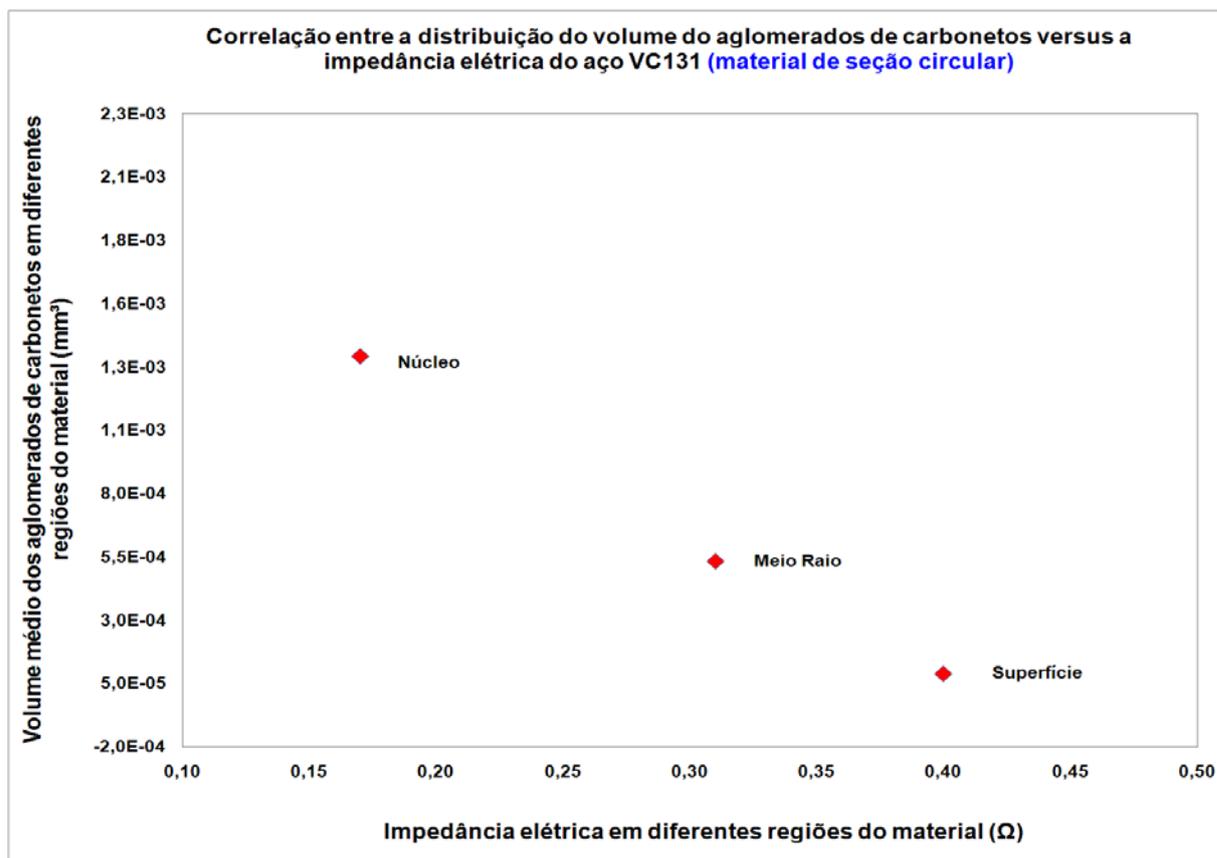


Figura 4.11: Correlação entre a distribuição do volume de aglomerados de carbonetos versus a impedância elétrica em diferentes regiões do aço VC131 (seção circular). Coeficiente de variação (desvio padrão/média) das medidas de volume em torno de 3%.

É possível evidenciar e concluir por meio da análise das Figuras 4.10 a 4.11, que quanto maior a distribuição dos aglomerados de carbonetos no material, menor é a impedância elétrica (causas já discutidas na seção 4.2 deste trabalho).

4.3 Avaliação/resultados dos ensaios de usinagem (indicador de produtividade em usinagem – desgaste das ferramentas de corte)

Por meio da análise da Figura 4.12 relativa aos resultados dos ensaios de fresamento do aço VC131 de seção retangular, pode-se observar que há diferenças expressivas quanto à usinabilidade nas diferentes regiões do material. Portanto é possível correlacionar que a distribuição dos aglomerados de carbonetos no material influi diretamente na usinabilidade deste. Conseqüentemente, em regiões mais refinadas do material é possível definir parâmetros de usinagem diferenciados, como por exemplo, aumento da velocidade de corte, elevando a produtividade da usinagem do material, bem como a redução do tempo de troca de ferramenta, que também influenciará na produtividade em usinagem.

É possível concluir, por meio da análise da Figura 4.13 obtida por MEV (microscopia eletrônica de varredura), que o desgaste da ferramenta utilizada na usinagem do material de seção retangular, por exemplo, é preferencialmente causado pelos aglomerados de carbonetos existentes no material, que é demonstrado nas imagens pelos sulcos na ferramenta de corte da ordem de 50 a 100 microns indicados por setas.

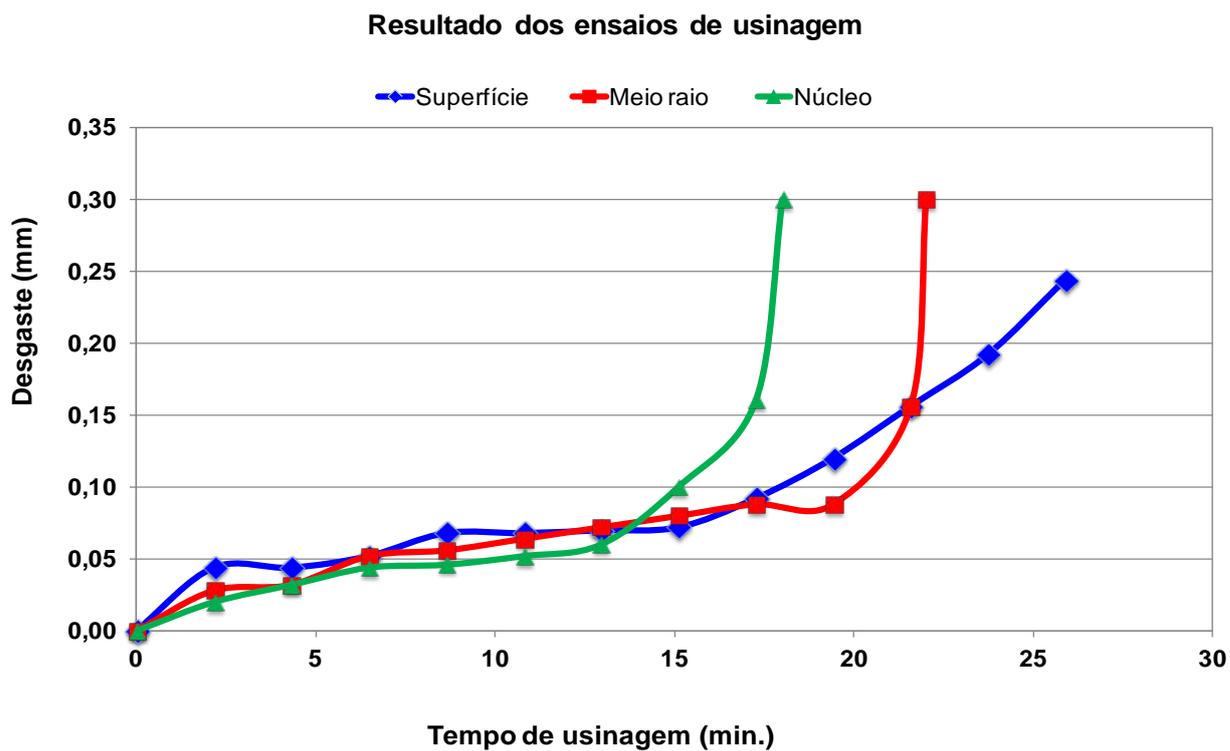
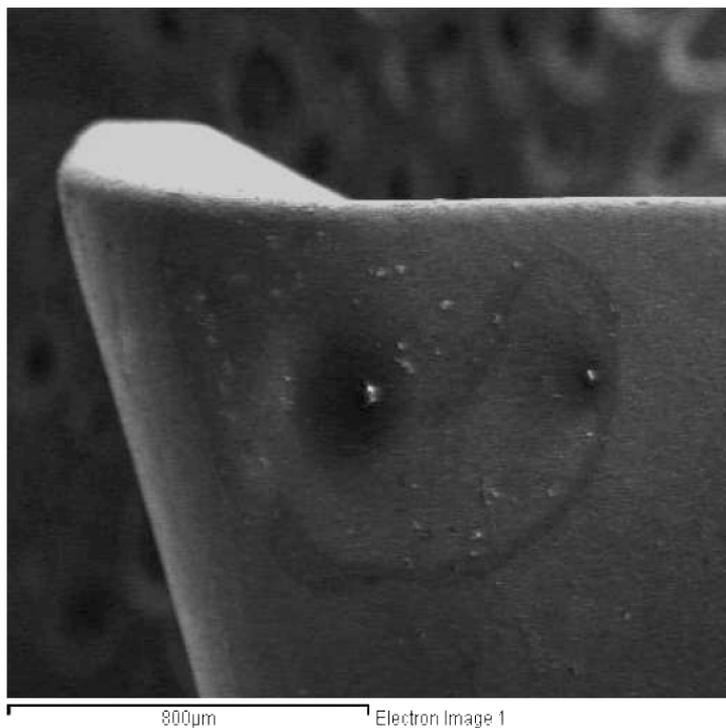
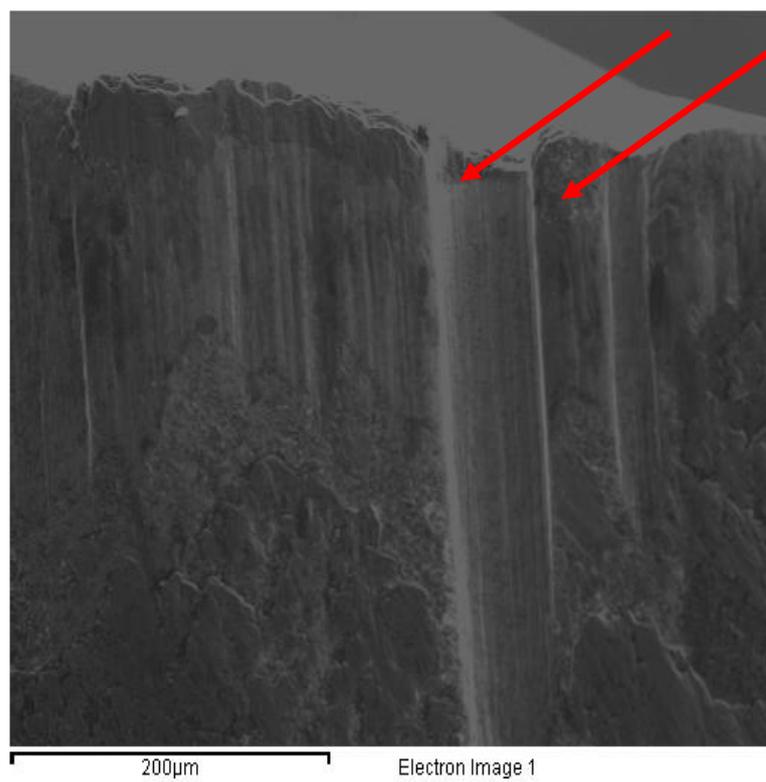
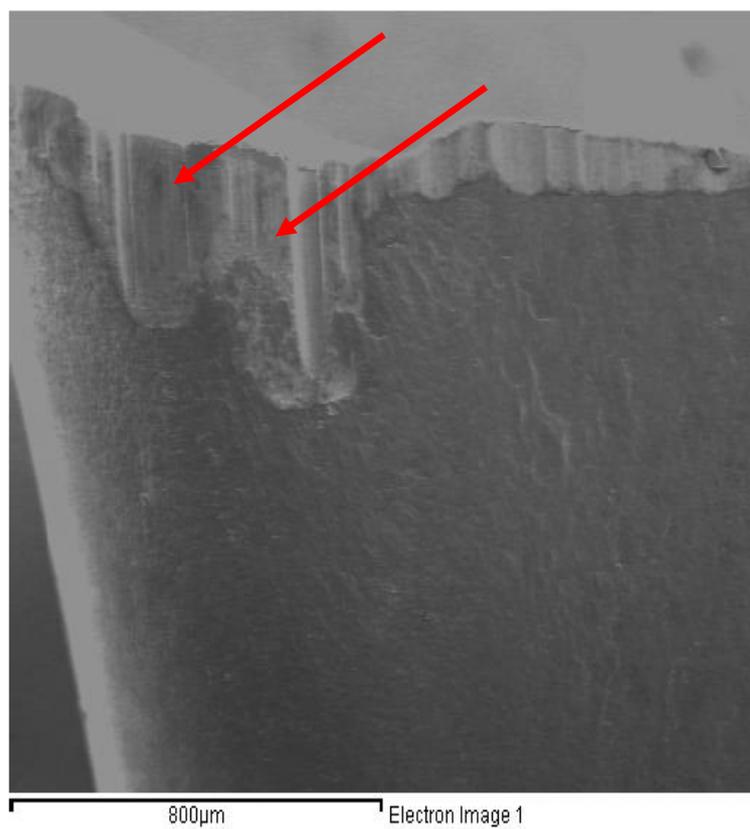


Figura 4.12: Resultado dos ensaios de usinagem no aço VC131 (seção retangular) por meio de fresamento, correlacionando o desgaste do material nas regiões da superfície, meio raio e núcleo do material *versus* o tempo de usinagem.



a)



b)

Figura 4.13: a) Ferramenta nova b) Análise do desgaste da ferramenta (indicado pelas setas) na usinagem do VC131 (seção retangular) por meio de microscopia eletrônica de varredura.

Em análise aos resultados da distribuição dos aglomerados de carbonetos no VC131 (seções retangular e circular), obtidos por meio de metalografia quantitativa e impedância elétrica versus os ensaios de usinagem realizados no desenvolvimento deste trabalho, é possível realizar algumas avaliações, como mostram as Figuras 4.14 e 4.15.

A Figura 4.14 demonstra a correlação entre a distribuição do volume de aglomerados de carbonetos versus o tempo de vida da ferramenta em diferentes regiões do aço VC131 (seções retangular).

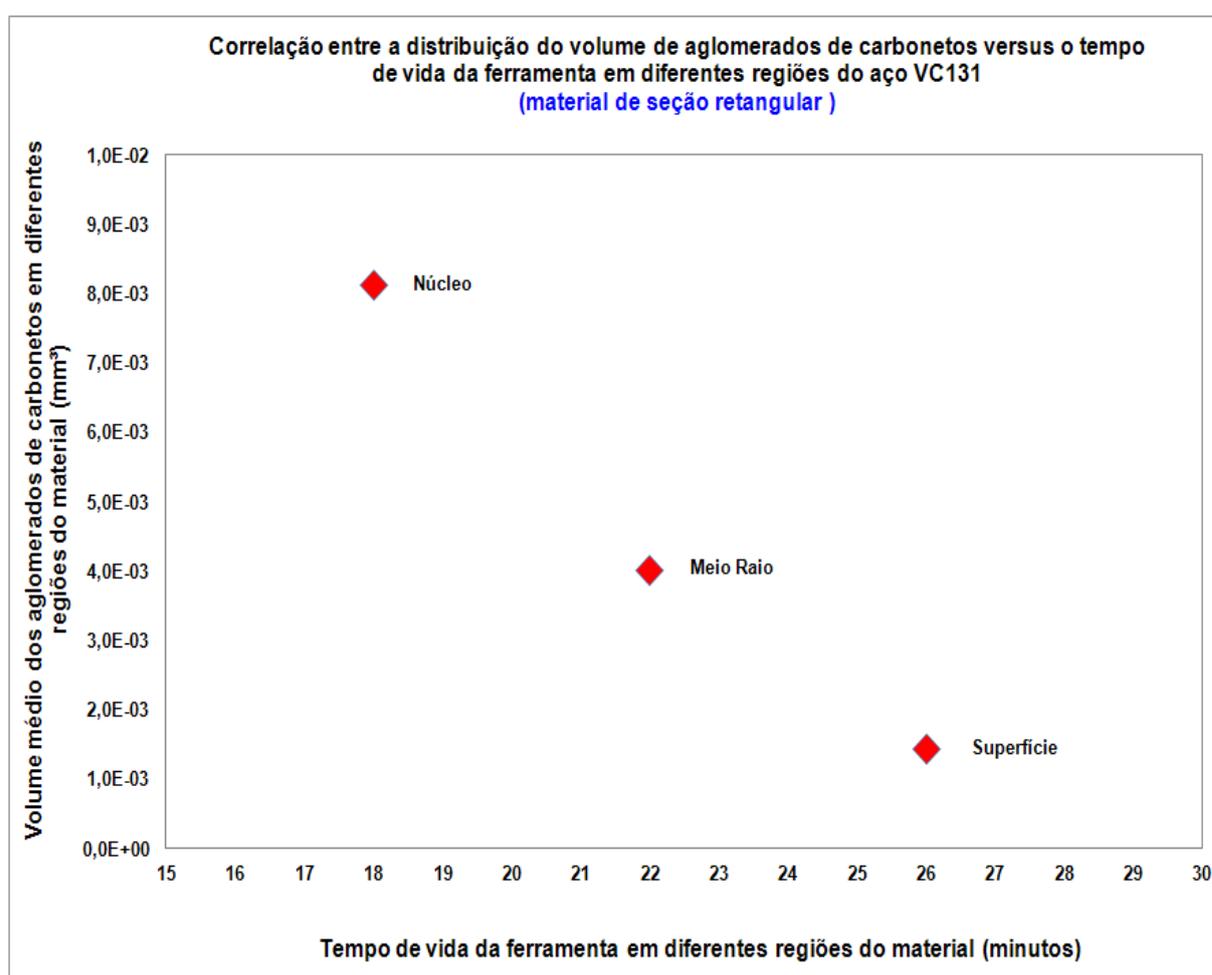


Figura 4.14: Correlação entre a distribuição do volume de aglomerados de carbonetos versus o tempo de vida da ferramenta em diferentes regiões do aço VC131 (seção retangular).

Por meio da análise da Figura 4.14, observa-se que na região superficial do material o tempo de vida da ferramenta em usinagem é maior, haja vista que o volume dos aglomerados dos carbonetos nesta região são menores. Nas regiões do meio raio e central (núcleo) do material, é possível evidenciar que há perda na produtividade da ferramenta, pela presença de aglomerados de carbonetos com volumes maiores aos da região da superfície.

A Figura 4.15 demonstra a variação da impedância elétrica do material versus o tempo de vida da ferramenta em diferentes regiões do material do aço VC131 (seção retangular).

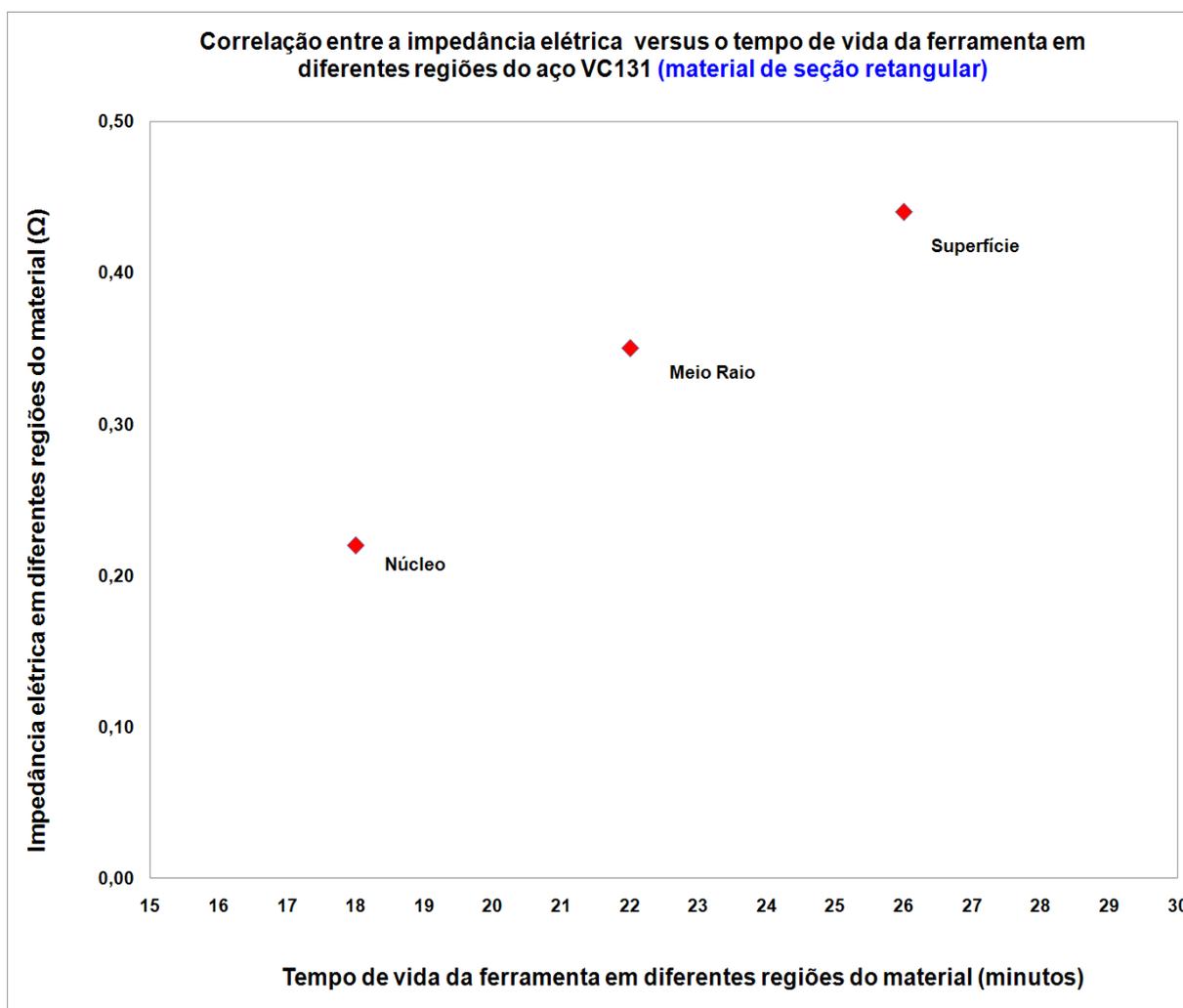


Figura 4.15: Correlação entre a impedância elétrica versus o tempo de vida da ferramenta em diferentes regiões do aço VC131 (seção retangular).

Portanto, na região superficial do material o tempo de vida da ferramenta em usinagem é maior e a impedância elétrica nesta região também é maior (causas já discutidas na seção 4.2 deste trabalho). Nas regiões do meio raio e central (núcleo) do material, onde há perda na produtividade da ferramenta pela presença de aglomerados de carbonetos com volumes maiores aos da região da superfície, a impedância elétrica do material é menor. Portanto, quanto maior o volume de aglomerados de carbonetos no material, a impedância elétrica neste é menor e o tempo de vida da ferramenta de usinagem também é menor.

4.4 Avaliação dos resultados dos indicadores de qualidade e produtividade versus os efeitos no custo em usinagem (indicadores de custo em usinagem)

Em qualquer processo produtivo o custo sempre será alvo de análise. Logo, por meio da obtenção e análise dos resultados relativos aos indicadores de qualidade e produtividade advindos deste trabalho, é possível relacionar estas variáveis ao custo em usinagem, analisando o custo com ferramenta para usinar o aço VC131 nas diferentes regiões do material estudadas neste trabalho. A partir desta análise é possível definir e sugerir alguns indicadores de custo em usinagem.

A Figura 4.16 demonstra a correlação entre a distribuição do volume de aglomerados de carbonetos no aço VC131 (seção retangular) versus o custo com ferramenta de usinagem. É possível concluir que esses dois fatores de análise são diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior a quantidade de aglomerados de carbonetos no material, maior será o custo de usinagem, haja vista que o desgaste da ferramenta será maior, reduzindo sua vida útil, conforme já demonstrado na seção 4.3 deste trabalho. Foi adotado o valor de R\$ 100,00 como sendo o preço da ferramenta de usinagem, para demonstração da correlação supracitada.

Obviamente, o custo da ferramenta irá variar caso a caso. Logo, objetiva-se nesta seção do trabalho clarificar a diferença em custo com ferramenta quando se usina aços ferramenta para trabalho a frio, em que a distribuição dos aglomerados de carbonetos nas diferentes regiões do material (superfície, meio raio e núcleo) é heterogênea, conforme demonstrado neste trabalho.

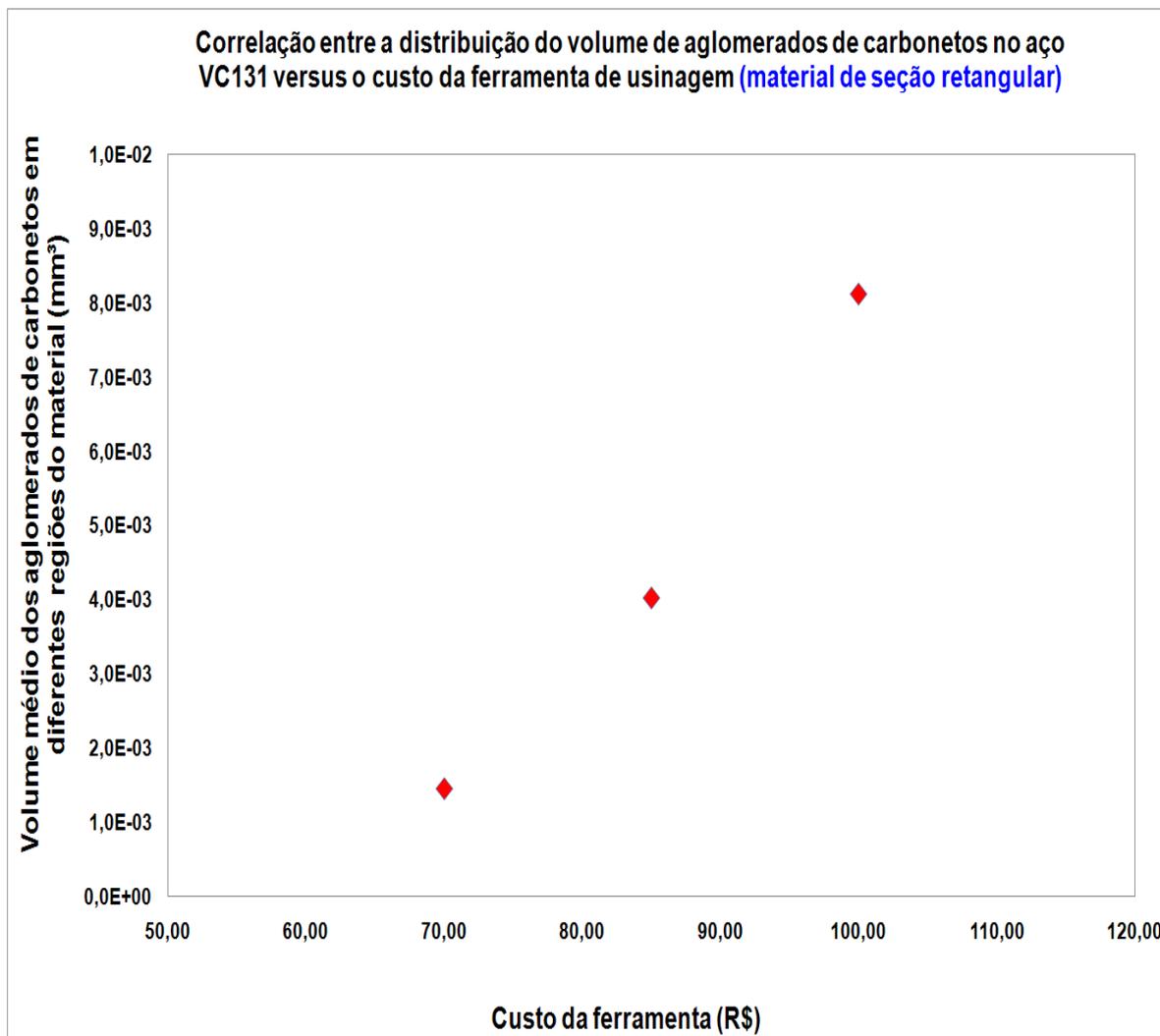


Figura 4.16: Correlação entre a distribuição do volume de aglomerados de carbonetos no aço VC131 (seção retangular) versus o custo da ferramenta de usinagem.

A Figura 4.17 demonstra a variação da impedância elétrica do aço VC131 (seção retangular) na direção longitudinal do material versus o custo com ferramenta em usinagem. É possível concluir que esses dois fatores de análise são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a impedância elétrica do material, menor será o custo de usinagem, aumentando sua vida útil conforme já demonstrado na seção 4.3 deste trabalho.

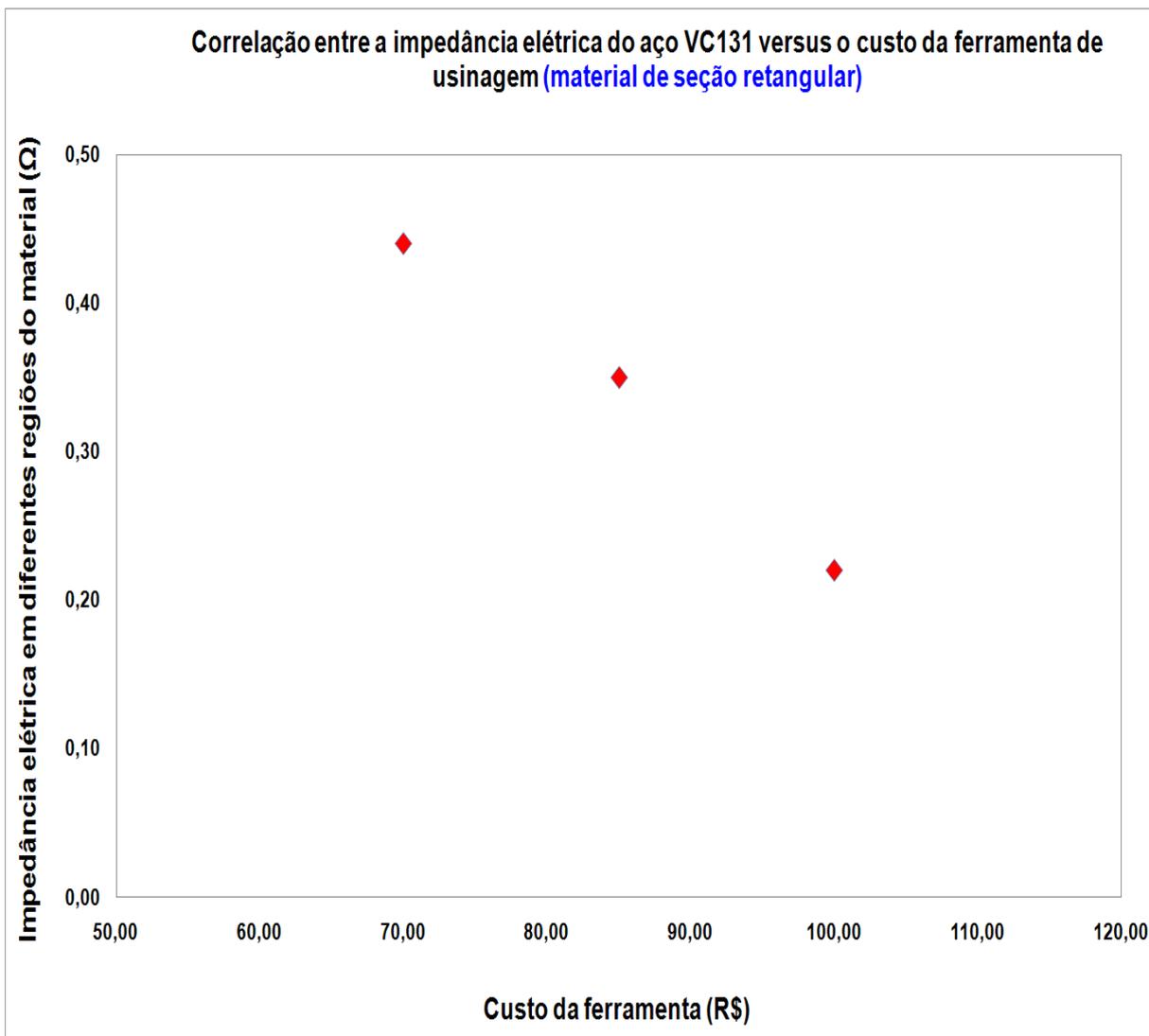


Figura 4.17: Correlação entre a impedância elétrica no aço VC131 (seção retangular) versus o custo da ferramenta de usinagem.

4.5 Discussões finais

A quantidade de carbonetos dos aços ledeburíticos de alto Cr, dos quais os aços da série D fazem parte, é determinada pela composição química, especialmente pelos teores de Cr e C. Um exemplo é mostrado no diagrama de equilíbrio da Figura 4.18. Portanto, em qualquer processo, a quantidade de carbonetos será definida pelo balanço entre C e Cr da liga, sendo a maior parte destes elementos dedicada à formação de carbonetos eutéticos nos aços da série D.

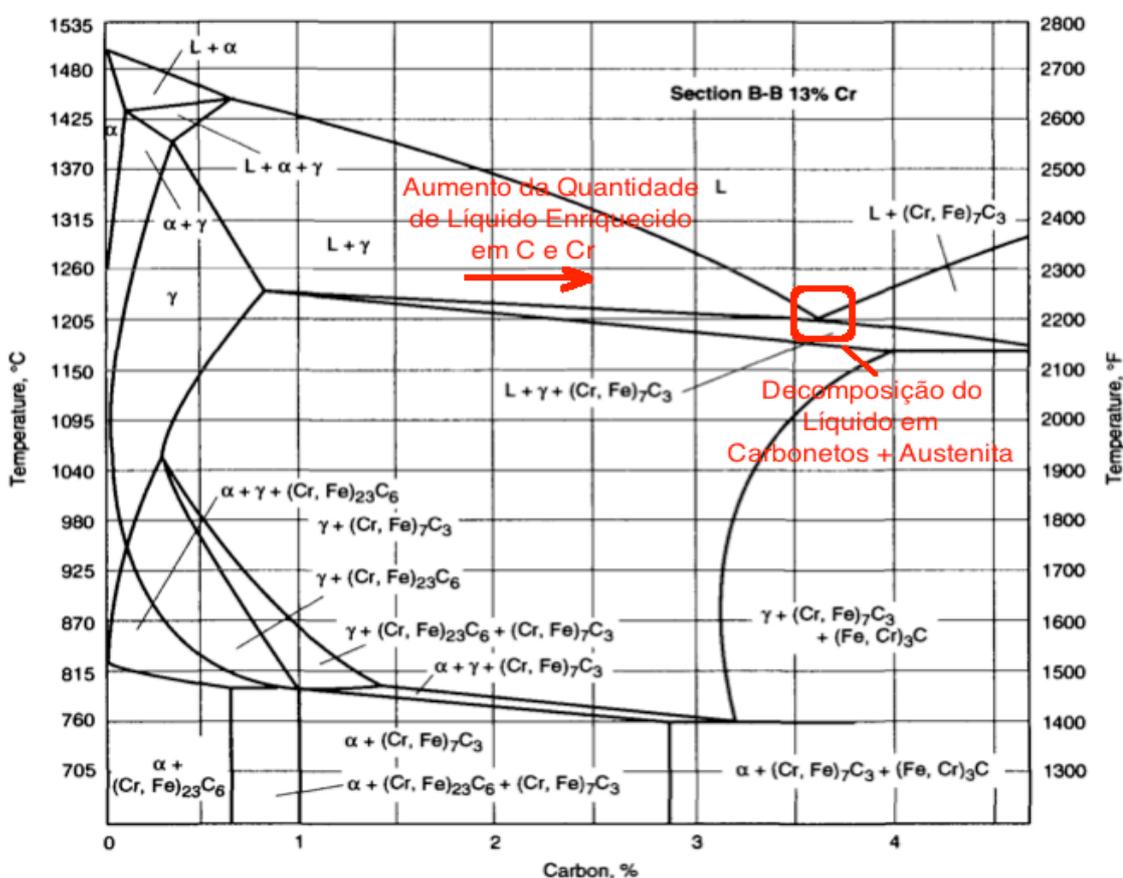


Figura 4.18: Seção vertical do diagrama pseudo-binário Fe-C-Cr, para teor fixo de 13% de Cr. Observar que o aumento da quantidade de carbono leva para um aumento da quantidade de líquido que solidifica no ponto eutético, significando que uma maior fração de carbonetos eutéticos será obtida. Adaptado a partir da referência (BUNGARDT et al.,1958).

Apesar da quantidade dos carbonetos ser definida pela composição química, a morfologia obtida será intimamente dependente do processo de solidificação e das subsequentes operações de conformação. Como mostrado quantitativamente por

Delgado e Mesquita (DELGADO & MESQUITA, 2009) em aços ligados de alto carbono, a solidificação em lingotes promove um refino contínuo da superfície ao centro (núcleo), porém não linear. A relação é exponencial, mostrando que as regiões próximas da parede do molde (superfície) tendem a ser muito mais refinadas e regiões do meio raio e centro (núcleo) são semelhantes, conforme demonstrado na Figura 4.19. Portanto, os resultados do presente trabalho mostram-se coerentes neste aspecto, apenas salientando que a conformação mecânica tende a diminuir a diferença na microestrutura, devido a fragmentação dos carbonetos. Este aspecto também foi mostrado por Delgado (DELGADO, 2010), resultando novamente em maior diferença entre a superfície e núcleo do que entre o maior-raio e núcleo.

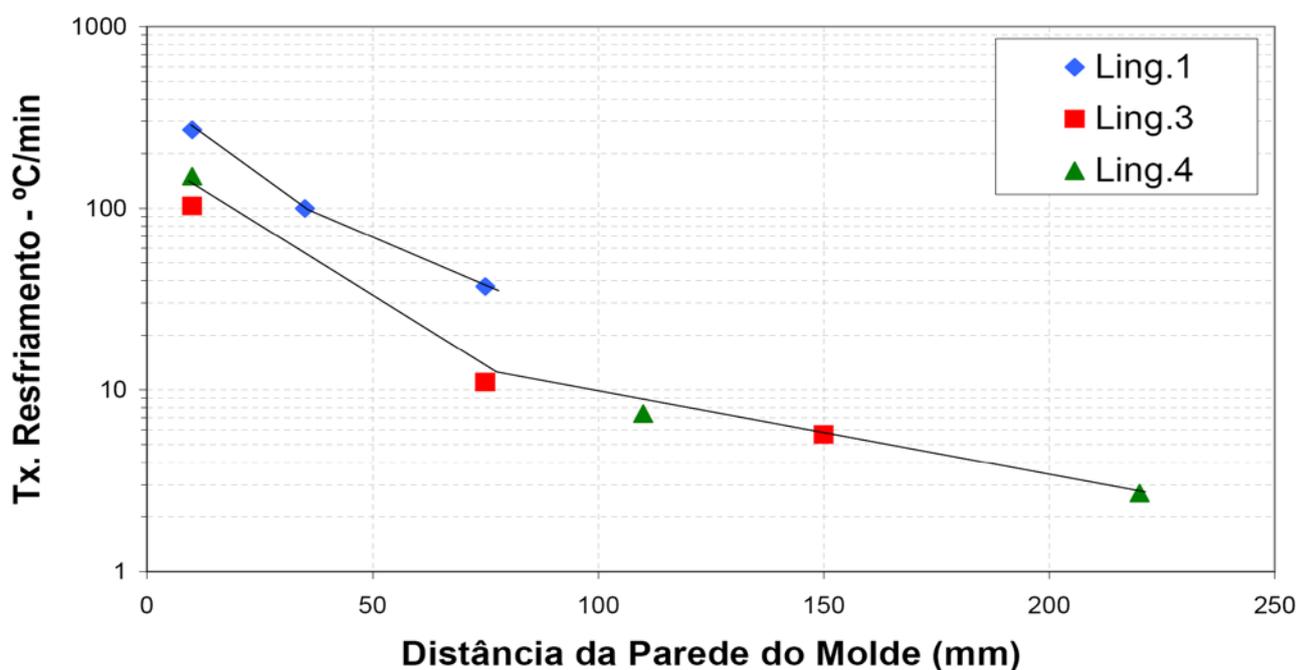


Figura 4.19: Taxa de resfriamento para três lingotes em função da distância da parede do molde.

Fonte: DELGADO; MESQUITA, 2009, p.7.

Os ensaios de metalografia realizados neste trabalho apontam que existe uma tendência de aumento do tamanho médio das partículas de carbonetos da superfície para o meio raio e, depois, uma tendência de estabilização. Portanto, o tamanho individual das partículas não pode ser utilizado para correlacionar à usinabilidade nem à resistividade, que mudam continuamente da superfície para o núcleo. Portanto, a hipótese válida é a que esta relacionada à análise do volume médio dos aglomerados de carbonetos, hipótese esta comprovada por duas razões:

1) Por explicar bem os resultados de usinagem e de impedância, mostrando variação contínua da superfície para o núcleo; 2) Porque as imagens de desgaste das ferramentas mostram sulcos da ordem de 50 a 100 microns, muito superiores aos tamanhos individuais das partículas e, portanto, semelhante aos aglomerados ou a partículas muito grandes.

Assim, prova-se que a usinabilidade e a impedância estão mais associadas aos aglomerados das partículas de carbonetos existentes no material do que ao tamanho unitário das partículas. Além disso, os aglomerados variam continuamente até o núcleo do material, motivo pelo qual a impedância e a usinabilidade também variam. Por fim, tendo como explicação a microestrutura do material, podemos voltar aos aspectos de custo e produtividade. Pode-se dizer que os aços para trabalho a frio não são homogêneos em sua microestrutura, sendo os aglomerados de carbonetos o fator mais importante nesta heterogeneidade. Pela relação linear entre esses aglomerados e a usinabilidade, os aglomerados podem ser associados como o principal indicador de qualidade desses materiais, no que tange o desgaste e desempenho em usinagem.

Em relação aos testes de impedância, estes também variam linearmente como os aglomerados de carbonetos. Desta forma, é possível relacionar diretamente os dados de impedância ao comportamento em usinagem. Assim, os dados de impedância podem ser utilizados como indicador da qualidade, em termos da microestrutura, e conseqüentemente prever o comportamento do material durante a usinagem. Portanto, abrem-se possibilidades como ensaio não destrutivo para predição do comportamento em usinagem. Em termos tecnológicos, a medida de impedância, de natureza elétrica, pode, portanto, ser integrada aos sistemas eletrônicos das máquinas ferramenta de usinagem. Assim, pode-se ter uma avaliação "online" do comportamento do material em usinagem e, além disso, um auto ajuste do processo, para buscar a melhor produtividade ou menor desgaste das ferramentas.

Há outros resultados na literatura, conforme exposto na revisão bibliográfica deste trabalho, que mostram a importância do estudo das partículas duras (os carbonetos) e o comportamento em usinagem dos materiais metálicos, objeto de estudo deste trabalho, corroborando a importância do tema proposto e da concordância aos resultados advindos do desenvolvimento deste trabalho.

Como fechamento das discussões finais e conseqüentemente deste trabalho, por meio da análise da Figura 4.20 é possível evidenciar um fluxo sintético da consecução à proposição inicial estabelecida para este trabalho (objetivos). À esquerda da Figura tem-se a proposição inicial para a realização deste trabalho (objetivos) e à direita à suposta negatificação à esta proposição. Por meio da correta estruturação dos métodos que seriam utilizados para o desenvolvimento deste trabalho e conseqüentemente a execução destes, foi possível refutar a negatificação, corroborando que a proposição inicial era válida.

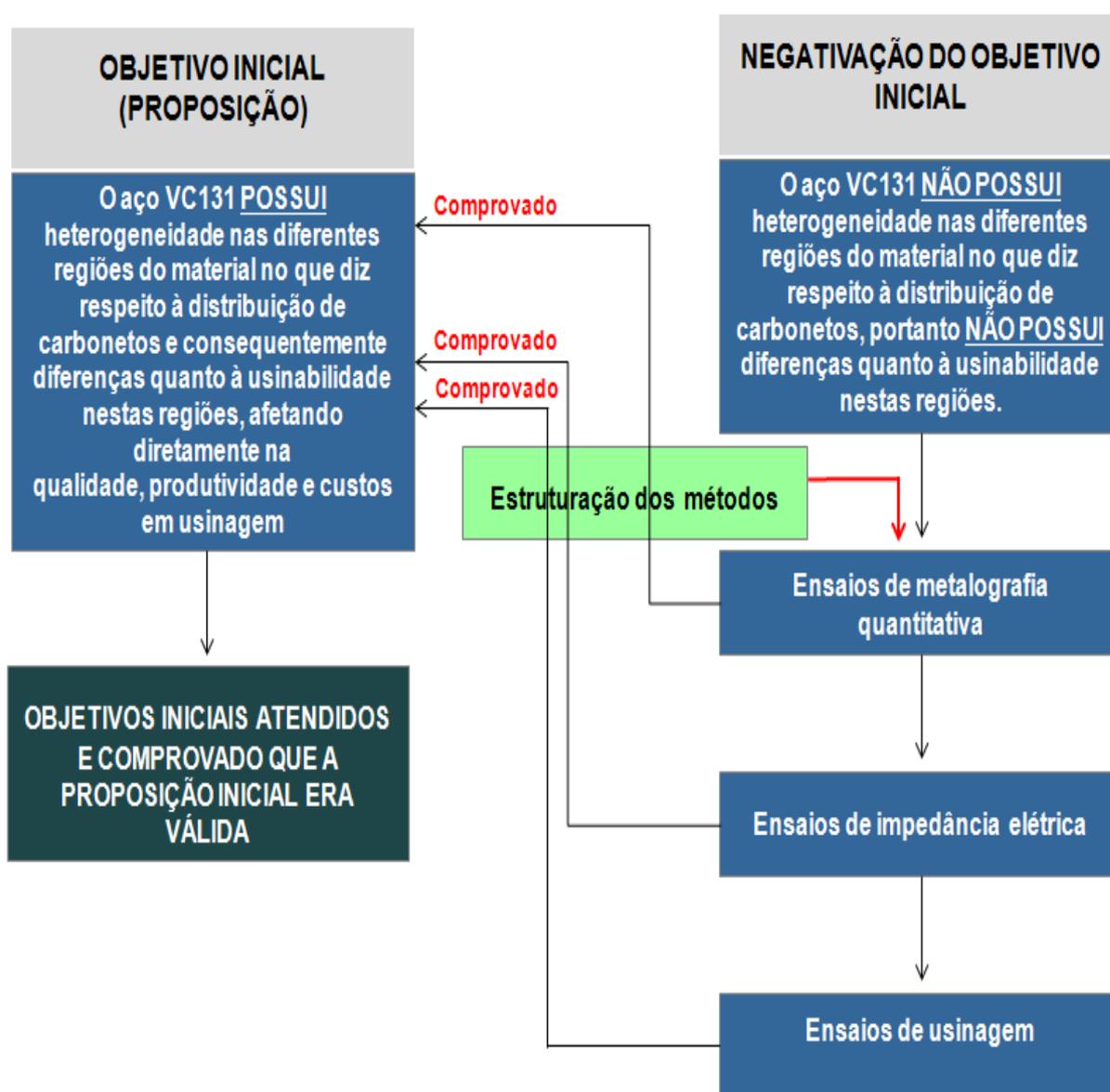


Figura 4.20: Fluxo sintético da análise do atendimento aos objetivos propostos para este trabalho.

5 CONCLUSÃO

A realização deste trabalho teve como objetivo quantificar e conseqüentemente avaliar a distribuição dos carbonetos em diferentes regiões das amostras do aço VC131 (material nas seções circular e retangular), de forma que pudesse ser evidenciado que existe uma variação na distribuição dos aglomerados de carbonetos da superfície para o centro (núcleo) do material e que essa variação influencia significativamente na sua usinabilidade e conseqüentemente no custo com ferramenta no processo de usinagem.

Os resultados do presente trabalho podem ser resumidos nos seguintes pontos:

- A metodologia apresentada é eficaz na quantificação dos carbonetos, por meio da técnica de metalografia quantitativa, técnica de análise de impedância elétrica e análise computacional de imagens;
- Os resultados apontam um refinamento expressivo das regiões da superfície da amostra, sendo este refinamento menos intenso entre o meio raio e centro (núcleo) do material;
- A comparação dos dados obtidos com resultados da literatura mostra-se coerente, sendo assim importante para a relação entre microestrutura e propriedades, resultados estes comprovados por meio da avaliação do efeito da distribuição dos carbonetos na usinabilidade nas diferentes regiões do material, podendo contribuir para os aspectos de custo e produtividade;
- Os resultados deste trabalho possam resultar em melhoria de qualidade nas ferramentas, gerando *inputs* para o uso de ferramentas mais eficazes para materiais com diferentes distribuições de carbonetos;
- Enfim, que novos indicadores de qualidade possam ser propostos para o material em termos de avaliação de aglomerados de carbonetos ou da impedância elétrica. E que tais indicadores influenciam diretamente os aspectos de produção de moldes e matrizes, como por exemplo, o custo das ferramentas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1) Avaliar a usinabilidade de materiais com diferentes frações volumétricas de carbonetos, a partir de estudo de demais aços da série D, com diferentes combinações de C e Cr;
- 2) Avaliar a usinabilidade do aço D6 obtido em diferentes processos de fabricação, como barras laminadas em diferentes seções, e comparar os resultados aos obtidos no presente trabalho, que focou em seções mais espessas;
- 3) Avaliar como os aglomerados de carbonetos influenciam, para um desgaste padrão, os parâmetros de corte empregados na usinagem e, assim, a produtividade na fabricação de uma matriz de trabalho a frio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTAN, T.; LILLY, B.; YEN, Y. C. **Manufacturing of dies and molds**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 50, n.2, 2001, p. 405-423.

ARUNACHALAN, R.; MANNAN, M. A. **Machining Science and Technology**, International Journal, Machining Science and Technology, , vol. 4:1, p. 127-168.

ASLAN, E. **Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X210 Cr12 cold- work tool steel (62 HRC)**. Master Design 26, 2005, p. 21–27.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9001:2008:Sistema de gestão da qualidade – Requisitos**. São Paulo: Editora ABNT, 2008, p. 2-4.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001:2004:** Sistema da gestão ambiental – Requisitos com orientações para uso. São Paulo: Editora ABNT, 2004, p. 5.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 18801:2010:** Sistema da segurança e saúde no trabalho – Requisitos. São Paulo: Editora ABNT, 2010, p. 7.

ARAÚJO, A. L. M. **Indicadores de qualidade e produtividade como instrumento de apoio à decisão no processo de expedição de veículos**. Revista Produção, vol. 7, n.2, Novembro de 1997, p. 139-157.

BARSOUKOV, E. **Impedance spectroscopy theory, experiment, and applications**. Second Edition. New Jersey, 2005, p. 15-21.

BERR, L. R.; FORMOSO, C. T. **Método para avaliação da qualidade de processos construtivos em empreendimentos habitacionais de interesse social**. Revista Ambiente Construído, vol. 12, n.2, Abril/Junho de 2012, p. 77-96.

BRAGHINI, A.; COELHO, R. T. **An investigation of the wear mechanisms of polycrystalline cubic boron nitride (PCBN) tools when end milling hardened steels at low/medium cutting speeds**. The International Journal of Advanced Manufacturing, vol. 17, 2001, p. 244–251.

BRANDÃO, H. P.; ZIMMER, M. V; PEREIRA, C. G.; MARQUES, F.; COSTA, H. V.; CARBONE, P. P.; ALMADA, V. F. **Gestão de desempenho por competências, o *balanced scorecard* e a avaliação 360 graus**. Revista de administração pública (RAP), vol. 42, n.5, Setembro/Outubro de 2008, p. 875-898.

BRESSAN, J. D., LOPEZ, K., LEITE, A. L., MESQUITA, R. A. **Estudo da resistência ao desgaste do aço Villares VF800AT com diferentes revenimentos**. In: Encontro da cadeia de ferramentas, moldes e matrizes, 6, 2008, São Paulo. Encontro da cadeia de ferramentas, moldes e matrizes, 6. , 2008. p.105-117 – CDROM.

BUNGARDT, K.; KUNZE, E.; HORN, E. **Investigation of the Structure of the Iron-Chromium-Carbon System**. Arch. Eisenhüttenwes, Vol 29, 1958.

CAMARGO, M. **Integração do SGQ NBR ISO 9001:2000 com um sistema de gestão por indicadores: Estudo de caso**. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2009. Dissertação, p. 11-13.

CAMUSCU, N.; ASLAN, E. **A comparative study on cutting tool performance in end milling of AISI D3 tool steel**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 170. 2005, p. 121–126.

CANTERLE, N. M. G.; FAVARETTO, F. **Proposta de um modelo referencial de gestão de indicadores de qualidade na instituição universitária**. Revista Ensaio: Avaliação de Políticas Públicas Educacionais, Rio de Janeiro, vol. 16, n.60, Julho/Setembro de 2008, p. 396-412.

Comunicação pessoal, equipe de assessoria técnica Villares Metals, 2012.

CORDEIRO, J. V. B. M. **Indicadores de desempenho em operações: Um estudo de caso em um fabricante de bens intermediários**. 14º Simpósio de Engenharia de Produção (SIMPEP). Novembro de 2007, p. 1-12.

DELGADO, M. P. **Efeito do perfil de resfriamento na solidificação do aço Rápido M2 e na microestrutura bruta de fusão**. São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais, 2010. Dissertação (Mestrado), p. 47.

DELGADO, M. P.; MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C. A. **Estudo da solidificação do aço rápido M2 em diferentes lingotes**. In: 64 Congresso Anual da ABM, 2009, Belo Horizonte. Anais do 64 Congresso Anual da ABM, 2009. v. 1. p. CD-ROM.

EZUGWU, E.O.; WANG, Z.M.; MACHADO, A.R. **The machinability of nickel-based alloys: a review**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 86. 1999, p. 1–16.

FERREIRA, M. P.; ABREU, A. F.; ABREU, P. F.; TRZECIAK, D. S.; APOLINÁRIO, L. G.; CUNHA, A. D. **Gestão por indicadores de desempenho: Resultados na incubadora empresarial tecnológica**. Revista Produção, vol. 18, n.2, Maio/Agosto de 2008, p. 302-318.

GALAS, E. S.; PONTE, V. M. R. **O *balanced scorecard* e o alinhamento estratégico da tecnologia da informação: um estudo de casos múltiplos**. Revista Cont. Fin. (USP), São Paulo, vol. 40, Janeiro/Abril de 2006, p. 37-51.

HUNG, N. P.; LOH, N. L.; XU, Z. M. **Cumulative tool wear in machining metal matrix composites Part II: Machinability**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 58, 1996, p. 114-120.

JUNIOR, E.S. **Efeito do tratamento térmico na microestrutura e nas propriedades mecânicas de aços-ferramenta para trabalho a frio**. Dissertação (Mestrado em Ciência na Área de Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2006.

KASAK, A; DULIS, E.J. **Powder Metallurgy Tool Steels**. Power Metall, vol. 2, 1978, p. 114-121.

KYSHAWY, H. A.; KANNAN, S.; BALAZINSKI, M. **Analytical modeling of tool wear progression during turning particulate reinforced metal matrix composites**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 54, n.1, 2005, p. 55-58.

KOSHY, P.; DEWES, R. C.; ASPINWALL, D. K. **High speed end milling of hardened AISI D2 tool steel (similar to 58 HRC)**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 127, 2002, p. 266–273.

KRAJNIK, P.; KOPAC, J. **Modern machining of die and mold tools**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 157-158, 2004, p. 543–552.

KHEIRANDISH, S.; SAGHAFIAN, H; HEDJAZI, J.; MOMENI, M. **Effect of heat treatment on microstructure of modified cast AISI D3 cold work tool steel**. Journal of Iron and Steel Research, International. vol. 17(9), 2010, p. 40-45, 52.

MARTINS, R. A.; NETO, P. L. O. C. **Indicadores de desempenho para a gestão pela qualidade total: Uma proposta de sistematização**. Revista Gestão & Produção, vol. 5, n.3, Dezembro de 1998, p. 298-311.

MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C. A. **Aço para Ferramentas de Alta Solicitação** . Patente PI0106606-4, 2001.

MESQUITA, R. A. **Aços para Moldes e Matrizes**. Apostila de Curso, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2004.

MESQUITA, R. A. **Aços especiais para moldes e matrizes – Uma abordagem voltada à indústria de conformação de metais, cerâmicas e polímeros**. 2º encontro da cadeia de ferramentas, moldes e matrizes. São Paulo, 2004.

MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C.A. **Failure Analysis in Tool Steels. Failure Analysis of Heat Treated Steel Components**. Ohio: Material Park - ASM, 2008, p. 12-18 e 311-355.

MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C.A. **Avaliação das propriedades de desgaste e tenacidade em aços para trabalho a frio**. Tecnologia em Metalurgia e Materiais (São Paulo. Impresso), v. 2, 2005, p. 12-18.

MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C.A.; MORALES, E. V.; KESTENBACH, H-J. **Effect of Silicon on Carbide Precipitation after Tempering of H11 Hot Work Steels**. Metallurgical and Materials Transactions. A, Physical Metallurgy and Materials Science, v. 42, online Nov. 2010, 2011, p. 461-472.

MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C.A. **Evaluation of as-HIPped PM high speed steel for production of large-diameter cutting tools**. Materials Science Forum, v. 416/18, 2003, p. 235-240.

MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C.A. **High speed steel produced through conventional casting, spray forming and powder metallurgy**. Materials Science Forum, v. 489, 2005, 244-250.

MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C.A.; MORALES, E. V.; KESTENBACH, H-J. **Secondary carbide precipitation in low silicon hot work tool steels.** Materials Science Forum, v. 636-37, 2010, 612-617.

MESQUITA, R. A.; H.-J. KESTENBACH, H-J. **On the effect of silicon on toughness in recent high quality hot work steels.** Materials Science & Engineering. A, Structural Materials: properties, microstructure and processing, 2011, p. 461-472.

MESQUITA, R. A., SOLOKOLOWSKI, A., BARBOSA, C.A. **Desenvolvimento de Aços Especiais com Usinabilidade Melhorada.** In: Anais do Evento Usinagem 2002, São Paulo. Anais do Evento Usinagem 2002, p. 1-20, CDROM.

MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C.A. **Aço para Ferramentas de Alta Solicitação** . Patente PI0106606-4, 2001.

MESQUITA, R. A.; ANDRIJAUSKAS, P. S.; BARBOSA, C.A. **Aços de alta tenacidade para matrizes de trabalho a frio.** In: ENCONTRO DE INTEGRANTES DA CADEIA PRODUTIVA DE FERRAMENTAS, MOLDES E MATRIZES, 1., 2003, São Paulo. Anais. São Paulo: ABM, 2003., P. 1-10.

OZBEN, T.; KILICKAP, E.; ÇAKIR, O. **Investigation of mechanical and machinability properties of SiC particle reinforced Al-MMC.** Journal of materials processing technology, vol. 198 (2008), p. 220–225.

NASCIMENTO, S; BORTOLUZZI, S. C.; DUTRA, A.; ENSSLIN, S. R. **Indicadores Mapeamento dos indicadores de desempenho organizacional em pesquisas da área de administração, ciências contábeis e turismo no período de 2000 a 2008.** Revista Administração, vol. 46, n.4, Outubro/Novembro/Dezembro de 2011, p. 373-391.

Norma ASTM A681-2008. **Standard specification for tool steels alloy**. Out./2008.

Norma ABNT NBR 6189. **Aços ferramenta**. Out./1982.

REACH, J.; CALVEZ, C. L.; DESSOLY, M. **A new approach for the characterization of machinability—application to steels for plastic injection molds**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 152, 2004, p. 66-70.

ROBERTS, G.; KRAUSS, G.; KENNEDY, R. **Tool steels**. 5. ed. Materials Park, Ohio: ASM International, 1998, p. 1-123, 219-250 e p. 251-290.

SEABRA, A.V. **Correlação das Propriedades Mecânicas dos Aços com a Microestrutura**. Lisboa, Memória Inec., 1979.

SILLER, H. R.; VILA, C.; RODRÍGUEZ, C. A.; ABELLÁN, J. V. **Study of face milling of hardened AISI D3 steel with a special design of carbide tools**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 40, n.1-2, 2009, p. 12–25.

SILVA, A.L.V.C. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Editora Blucher, 4ª edição, 2008, p. 126-132.

SILVA, A.L.V.C.; MEI, P.R. **Aços e ligas especiais**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 3ª edição, 2010, p. 363-372.

SILVA, F. A.; FARIAS, T. M. B.; MESQUITA, R. A. **Quantificação dos carbonetos no aço para trabalho a frio VC131 via metalografia quantitativa**. 9º encontro da cadeia de ferramentas, moldes e matrizes. São Paulo, 2011, p. 69-78.

SHIMIZY, T.; FUJI, T. **Mirror surface finishing properties of plastics mold steels**. Daido Steel Co. Ltd. Electric Furnace Steel, Japan, v.74, n. 2, p.125-130, 2003.

SOARES, T. D. L. V. A. M; RATTON, C. A. **Medição de desempenho e estratégias orientadas para o cliente: Resultados de uma empresa líder no Brasil.** Revista de Administração de Empresas (RAE), São Paulo., vol. 39, n.4, Outubro/Dezembro de 1999, p. 46-59.

SONGMENE, V.; BALAZINSKI, M. **Machinability of Graphitic Metal Matrix Composites as a Function of Reinforcing Particles.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 48, n. 1, 1999, p. 77-80.

SOUSA, R. R. M.; MENDES, M. L. M.; VALADÃO, E. M.; BRANDIM, A. S.; OLIVEIRA, M. D.; ALVES JR, C. **Aço ferramenta para trabalho a frio AISI D6 tratado termicamente e nitretado em plasma com gaiola catódica.** Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, v. 27, n. 4, 2008, p. 223-224.

TARGET ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA. **OHSAS 18001:2007: Sistema de gestão da saúde e segurança no trabalho – Requisitos.** São Paulo, 2007.

WEI, S.; ZHU, J.; XU, L. **Effects of vanadium and carbon on microstructures and abrasive wear resistance of high speed steel.** Tribology International, vol. 39, 2006, p. 641–648.

WILSON, W. **Metallurgy and Heat Treatment of Tool Steels.** McGraw-Hill, London, 1975, p. 378.

ZANCO, F.R.; ROSA, P.L.S.; GREGO, G.R.; SACHETO, G.B. **Aplicação de indicadores de qualidade em uma empresa do setor de fundição.** 18º Simpósio de Engenharia de Produção (SIMPEP). Bauru, 2011, p. 4-9.

ZHANG, Q.; QIU J.; WANG, Y.; GU, M. **Studies on machinability of Al/Sip + SiCp composite materials.** Journal of Material Science, 2007, vol. 42, p. 5845–5850.

ZHOU, J.; BUSHLYA, V.; STAHL, J. E. **Study of surface quality in high speed turning of Inconel 718 with uncoated and coated CBN tools.** The International Journal of Advanced Manufacturing, vol. 58, 2012, p. 141-151.